

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-194268

(43)Date of publication of application : 19.07.2001

(51)Int.Cl.

G01M 11/02
G02F 1/01

(21)Application number : 2000-265529

(71)Applicant : COMMUNICATIONS RESEARCH LABORATORY MPHPT
KAZI SARWAR ABEDIN

(22)Date of filing : 01.09.2000

(72)Inventor : KAZI SARWAR ABEDIN

(30)Priority

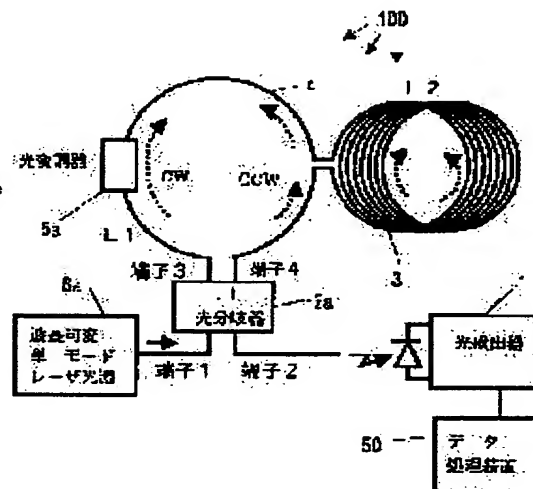
Priority number : 11315413 Priority date : 05.11.1999 Priority country : JP

(54) LIGHT DISPERSION MEASURING DEVICE AND MEASURING METHOD TO USE THE SAME

(57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a light dispersion measuring device and its measuring method capable of reducing cost for measuring light dispersion by a simple device.

SOLUTION: In the method to utilize a ring-type interferometer including an optical modulator, right-handed light is modulated before passing through an object to be measured, and left-handed light is modulated after passing through the object to be measured. As these two components interfere with each other at the time of emergence from the terminals of the interferometer and average output power on time depends on modulation frequencies by the effects of dispersion of the object to be measured, it is possible to obtain interference fringes with a periodic structure by measuring the average output of light as scanning the modulation frequencies. When the wavelength of a light source is slightly changed, the phenomenon of a shift in the fringes is observed. The wavelength dispersion of light is measured through the use of the phenomenon.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 01.09.2000

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3388227

[Date of registration] 10.01.2003

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号
特開2001-194268
(P2001-194268A)

(43)公開日 平成13年7月19日(2001.7.19)

(51)IntCl.⁷

識別記号

F I

マークシート(参考)

G 0 1 M 11/02

G 0 1 M 11/02

K 2 H 0 7 9

G 0 2 F 1/01

G 0 2 F 1/01

B

審査請求 有 請求項の数16 O L (全 30 頁)

(21)出願番号 特願2000-265529(P2000-265529)

(22)出願日 平成12年9月1日(2000.9.1)

(31)優先権主張番号 特願平11-315413

(32)優先日 平成11年11月5日(1999.11.5)

(33)優先権主張国 日本(J P)

(71)出願人 301001775

総務省通信総合研究所長

東京都小金井市眞井北町4-2-1

(71)出願人 599022742

カジ サルワル アベディン

KAZI SARWAR ABEDIN

兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡588-2 郵

政省通信総合研究所 関西先端研究センタ
ー内

(74)代理人 100082669

弁理士 福田 賢三 (外2名)

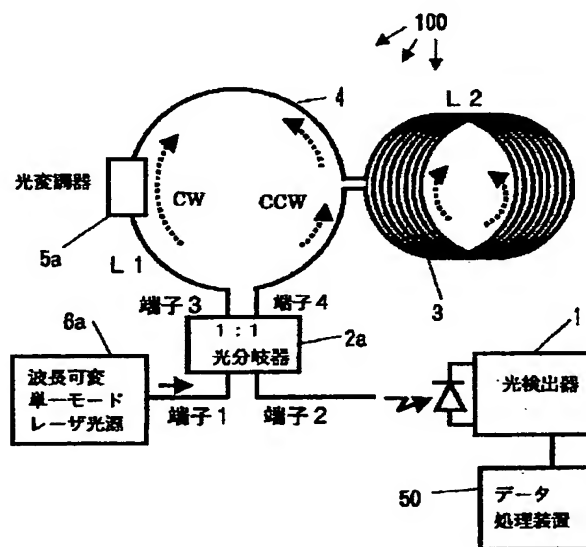
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 光分散測定装置およびそれを用いた測定方法

(57)【要約】

【課題】 簡単な装置により、光分散測定コストの削減を図ることができる光分散測定装置およびその測定方法を提供することを目的とする。

【解決手段】 光変調器を含むリング型の干渉計を利用した方法で、右回りの光は、被測定物を通過する前に変調され、左回りの光は、通過した後で変調を受ける様にする。これら2つの成分は干渉計の端子から出射する際お互い干渉し合い、時間についての平均出力パワーが、被測定物の分散による効果で変調周波数に依存するので、変調周波数をスキャンしながら、光の平均出力測定すれば周期的な構造を持った干渉フリンジが見られる。光源の波長を僅かに変えると、フリンジがシフトする現象が見られ、この現象を用いて、光の波長分散測定する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 光発生手段と、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手段と、該光分岐器の第一端子より入力した光を、複数の光として出力する手段と、該複数の光の内のすくなくとも2つの光を変調する光変調手段と、上記の2つの光を該光分岐器に戻す光路と、該光分岐器に戻された光を該光分岐器の第二端子に出力する手段と、該第二端子から出力された光を検出する手段と、上述の光の検出強度を光変調の変調周波数に関連付ける手段と、を有することを特徴とする光分散測定装置。

【請求項2】 光発生手段と、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手段と、該光分岐器より出力した光を、光分岐器の第三端子および第四端子に出力する手段と、該第三端子から第四端子へ向かう光と、該第四端子から第三端子へ向かう光とを変調する光変調手段と、上記の変調された第三端子から第四端子へ向かう光と第四端子から第三端子へ向かう光とを該光分岐器の第二端子に出力する手段と、該第二端子から出力された光を検出する手段と、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付ける手段と、を有することを特徴とする光分散測定装置。

【請求項3】 光発生手段と、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する構成と、該光分岐器の第一端子より入力した光を、直交関係に有る偏波をもった2つの光成分に変換する手段と、上記の2つの光成分の内の一方を被測定物を通過前に変調し、他の一方を被測定物を通過後に変調する構成と、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器に戻す構成と、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器の第二端子に出力する構成と、該第二端子から出力された予め決められた偏波にある光を検出する手段と、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付ける手段と、を有することを特徴とする光分散測定装置。

【請求項4】 請求項1、2あるいは3に記載の光分散測定装置において、波長を変えることのできる光発生手段を備えた事の特徴とする光分散測定装置。

【請求項5】 請求項1、2あるいは3に記載の光分散測定装置において、上記の光分岐器を出て、再び上記の光分岐器にもどる光路の光路長を変えることのできる構成を備えた事の特徴とする光分散測定装置。

【請求項6】 請求項1あるいは2に記載の光分散測定装置において、上記の光分岐器には、第一端子ないし第四端子があり、その第三端子から第四端子へ向かう光を調整する第一の偏波調整手段と、該第四端子から第三端子へ向かう光を調整する第二の偏波調整手段とを備えたことを特徴とする光分散測定装置。

【請求項7】 請求項1、2あるいは3に記載の光路の一部に、被測定物を配置した構成であることを特徴とする光分散測定装置。

【請求項8】 請求項1、2あるいは3に記載の光路の一部が光反射手段により構成されていることを特徴とする光分散測定装置。

【請求項9】 請求項7に記載の光分散測定装置の光路の一部に配置された被測定物に、光反射手段を配置した構成としたことを特徴とする光分散測定装置。

【請求項10】 請求項1あるいは2に記載の光分散測定装置の光路に、90度ファラデー回転子を設けることにより、光分岐器の第二端子からの光の出力を、光が変調を受けた時よりも変調を受けないときの方が大きくなるか、あるいは、光が変調を受けた時よりも変調を受けないときの方が小さくなるかしたことを特徴とする光分散測定装置。

【請求項11】 請求項1乃至9に記載の光分散測定装置における少なくとも一対の光変調器は、光変調器の順変調方向がお互いに逆の向きにあることを特徴とする光分散測定装置。

【請求項12】 光発生手段により光を発生させる手続きと、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手続きと、該光分岐器の第一端子より入力した光を、複数の光として出力する手続きと、複数の光の内のすくなくとも2つの光を変調する手続きと、上記の2つの光を該光分岐器に戻す手続きと、該光分岐器に戻された光を該光分岐器の第二端子に出力する手続きと、該第二端子から出力された光を検出する手続きと、上記の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付ける手続きと、を有することを特徴とする光分散測定装置を用いた測定方法。

【請求項13】 光発生手段により光を発生させ、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射し、該光分岐器の第一端子より入力した光を、光分岐器の第三端子および第四端子に出力し、該第三端子から出力された光と、第四端子から出力された光を単一の光路に、進行方向を互いに逆に導き、該光路を通る該第三端子から第四端子へ向かう光と、該光路を通る該第四端子から第三端子へ向かう光とを変調し、上記の変調された第三端子から第四端子へ向かう光と第四端子から第三端子へ向かう光とを該光分岐器の第二端子に出力し、該第二端子から出力された光を検出し、上記の光変調による変調周波数と、第二端子から出力された光の光強度の関係において周期性を見出し、該周期性の、上記の第一端子より入力した光の波長に対する依存性から、上記の光路の波長分散特性を取得することを特徴とする光分散測定装置を用いた測定方法。

【請求項14】 光発生手段により光を発生させる手続きと、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手続きと、該光分岐器より出力した光を、直交関係に有る偏波をもった2つの光成分に変換する手続きと、上記の2つの光成分の内の一方を被測定物を通過前に変調し、他の一方を被測定物を通過後に変調する手続

きと、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器に戻す手続きと、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器の第二端子に出力する手続きと、該第二端子から出力された予め決められた偏波にある光を検出する手続きと、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付ける手続きと、を有することを特徴とする光分散測定装置を用いた測定方法。

【請求項15】 光発生手段により光を発生させ、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射し、該光分岐器の第一端子より入力した光を、光分岐器の第三端子および第四端子に出力し、該第三端子から出力された光と、第四端子から出力された光を実質的に単一の光路に、進行方向を互いに逆に導き、該光路を通る該第三端子から第四端子へ向かう光と、該光路を通る該第四端子から第三端子へ向かう光とを第二端子から出力される光の光強度の関係において見出される周期性の周期以上の周波数を持つ信号で変調し、上記の変調された第三端子から第四端子へ向かう光と第四端子から第三端子へ向かう光とを光分岐器の第二端子に出力し、該第二端子から出力された光を検出し、上記の光変調による変調周波数と、第二端子から出力された光の光強度の関係において周期性を見出し、その周期性を用いて、上記の光路の光路長あるいは光路長の変化を見出すことを特徴とする光分散測定装置を用いた測定方法。

【請求項16】 光発生手段により光を発生させ、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射し、該光分岐器より出力した光を、直交関係に有る偏波をもった2つの光成分に変換し、上記の2つの光成分の内の一方を被測定物を通過前に第二端子から出力される光の光強度の関係において見出される周期性の周期以上の周波数を持つ信号で変調し、他の一方を被測定物を通過後に上記の周波数と同じ周波数の信号で変調し、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器に戻し、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器の第二端子に出力し、該第二端子から出力された予め決められた偏波にある光を検出して、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付け、その関連性から上記の光路の光路長あるいは光路長の変化を見出すことを特徴とする光分散測定装置を用いた測定方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、光分散測定装置およびその測定方法に関するものであり、特にシングルモード光ファイバーを伝搬する光の群速度分散を測定するための測定装置と、本発明の測定装置を用いた上記の群速度分散の測定、光ファイバーの正確な長さの測定、あるいは被測定物までの距離の測定における測定方法に關している。

【0002】

【従来の技術】光信号は光ファイバー中を伝搬するとき

に、異なる波長を持つ光は異なる速度で伝搬する。この現象は群速度分散と呼ばれる。この群速度分散のため光ファイバー中を光パルスが伝搬するときにパルスの広がる原因となる。光通信において、現在では1.3 μ 及び1.55 μ の波長領域が主に使われ、長距離間で光信号を伝送するのに、最適な分散特性をもつ光ファイバーを利用する必要がある。また、パルス中のチャープの保証や非線形効果と分散効果を利用した光ファイバーを用いたパルス発生法などにおいて最適な群速度分散及び長さを持つ光ファイバーを用いる必要がある。このような目的において、シングルモード光ファイバーの群速度分散の測定は必要不可欠である。

【0003】光ファイバーなどの群速度分散を測定するための方法としては、a)パルス遅延(Pulse-Delay)法、b)干渉(Interferometric)法、c)位相シフト(Phase Shift)法、d)ベースバンドエーエムレスポンス(Baseband AM response)法が主に用いられている。以下にこれらの方法について、説明する。

【0004】a)パルス遅延法による群速度分散の測定については、例えば次の文献に記載されている(L. G. Cohen and Chinlon Lin, Pulse Delay measurements in the zero material dispersion wavelength region for optical fibers, Applied Optics, Vol. 16, No. 12, pp. 3136-3139 (1977).)。このパルス遅延法では、異なる中心波長を持つ光パルスを測定する光ファイバー中で伝搬させ、光ファイバーにおいて光パルスの相対的伝搬遅延時間の測定から群速度分散を測定するものである。この方法を用いた場合の測定精度は、入射パルスの幅、相対的遅延時間の測定に用いる光検出器の周波数帯域、及び時間軸について観測するためのオシロスコープの周波数帯域によって制限されるため、光検出器およびオシロスコープについては、高帯域のものが必要になる。

【0005】b)干渉法による群速度分散の測定については、例えば次の文献に記載されている(M. Tateda, N. Shibata and S. Seikai, Interferometric method for chromatic dispersion measurement in a single-mode optical fiber, IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, Vol. 17, No. 3, pp. 404-407 (1981).)。この干渉方法は光パルスを2つの成分に分岐させ、一方はレファレンス光として用い、もう一方は光ファイバーを伝搬させる。透過後の光を、光遅延回路を

通ったレファレンス光に干渉をさせ、レファレンス光の遅延を変えて干渉フリンジを得るものである。入射光波長の変化による干渉フリンジの変化から群速度分散を導く。この方法は高周波数帯域を持つ光検出器、オシロスコープなどを必要としないが、長い光ファイバーの分散の測定はこの方法では困難であり、通常測定できる光ファイバーの長さは、10m以下に限られる。

【0006】c) 位相シフト法による群速度分散の測定については、例えば次の文献に記載されている(K.

Daikoku and A. Sugimura, Direct measurement of wavelength Dispersion in optical fiber-difference method, Electronics letters, 1978, Vol. 14, No. 5, pp. 149-151.)。この位相シフト法では、単一モードレーザー光を先ず光変調器を用いて変調し、固定される光ファイバーに入射する。入射した光は、光ファイバーの群速度分散効果をうけ、光ファイバーから出射する光のベースバンド信号の位相が光の波長の変化とともに変化する。波長の変化に対するベースバンド信号の位相の変化をオシロスコープ上で測定し群速度分散を導く方法である。ここで得られる測定精度は変調周波数、光検出器、及びオシロスコープの周波数帯域によって制限される。

【0007】d) ベースバンドAMレスポンス(Baseband AM Response)法による群速度分散の測定については、例えば次の文献に記載されている(B. Christensen, J. Mark, G. Jacobsen and E. Bodtker, Simple dispersion measurement technique with high resolution, Electronics Letters, 1993, Vol. 29, No. 1, pp. 132-134.)。この測定法は、群速度を直接測る点に特徴があり、単一モードレーザー光を高周波数で振幅変調し、光ファイバーに入射する。光ファイバーをその入射光が伝搬する際、分散のため上記の振幅変調により生じた2つのサイドバンドが異なった位相の変化を受け、その結果として、ある特定の

変調周波数において、変調は振幅変調から周波数変調に変化する。この周波数を測定し、直接群速度分散が得られる。この方法で測定するには、被測定物として数十kmの長い光ファイバーを使う必要があり、しかも数十GHzの周波数帯域を持つネットワークアナライザが必要となる。

【0008】また、本発明の構成に類似のものにサニャック効果に基づく光ジャイロがあり、例えば、アメリカ合衆国特許(USA, PAT. No. US5056919号公報)に記載されている。この発明は、装置の構成

目的が本発明とは異なる。このため、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手段と、該光分岐器の第一端子より入力した光を、光分岐器の第三端子および第四端子に出力する手段と該第三端子および第四端子を結ぶ概略単一の光路と、該光路を通る該第三端子から第四端子へ向かう光と、該光路を通る該第四端子から第三端子へ向かう光とを変調する光変調手段と、上記の変調された第三端子から第四端子へ向かう光と第四端子から第三端子へ向かう光とを光分岐器の第二端子に出力する手段と、該第二端子から出力された光の光強度を検出する手段を備えている点については、本発明の特徴と共通しているが、この発明の他の特徴のひとつに単色光源を用いることが有り、一方、本発明では波長を変えることのできる光発生手段を用いることが特徴のひとつになっており、この点で異なっている。また、本発明では、上記の光変調の変調周波数をスキャンし、変調周波数の周期関数として上述の第二端子から出力された光の光強度を変調周波数に関連付ける手段を備えているが、この点においても異なっている。本発明では、波長を変える手段を備えているため、波長を変えることによって、干渉計を構成するファイバーの分散の影響についても測定が可能になった。また、光ジャイロは、交換できる被測定物を持たず、回転などの測定に利用されることに対し、本発明では交換できる被測定物がありそれが干渉計の一部として構成されていて、その光学特性が測定されることにも大きな違いがある。また光ジャイロの場合は、固定されたEIGENFREQUENCY(固有周波数 f で、 $f=c/(2nL)$; n , L , 及び d は屈折率、Loopの長さ、光の真空速度)で変調を行うのに対し、本測定方法では変調周波数をEIGENFREQUENCYより非常に高い周波数(RF周波数領域)でスキャンし被測定物の光学特性の測定を行うことにも違いがある。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかし、従来の光分散測定装置およびその測定方法では、従来のパルス遅延法、位相シフト法またはベースバンドエーエムレスポンス(Baseband AM Response)法を用いて群速度を測定する際、広い周波数帯域(数GHzから数十GHz)を持つ光検出器やオシロスコープやネットワークアナライザなどが必要であった。

【0010】この発明は上記に鑑み提案されたもので、簡単な装置により、光分散測定コストの削減を図ることができる光分散測定装置およびその測定方法を提供することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明では、従来には無かった光ファイバーの群速度分散を測定するための新しい方法と、その測定のための測定装置を提案している。この新しい方法を用いることによって光ファイバーの群速度分散の測定は、従来の

測定に比べてより簡単な装置で行うことができるようになった。これを以下に説明する。

【0012】この新しい測定方法は、図1にその動作概念を示す様に、(1)光変調器を含むリング型の光路で構成された干渉計を利用した方法と、図13にその構成を示した様に、(2)線形の光路で構成された干渉計を利用した方法とである。

【0013】(1)リング型の光路で構成された干渉計を利用した方法

図1に示す光分散測定装置100は主に、波長可変単一モードレーザ光源6a、一般に3dbカブラとして知られる光分岐器2a、位相変調器あるいは強度変調器5a、リング状光路4、及び測定される光ファイバー3、光検出器1から構成され、かつ位相変調器あるいは強度変調器5aはリングに非対称な位置に設置されている。ここでは、光源としての単一モードレーザ光を端子1に射し、光分岐器2aを用いて、端子3と端子4に出力し、2つの成分に分ける。端子3から出射する一方の光成分は位相変調器あるいは強度変調器5aで変調された後、測定される光ファイバー3の一端に入力される。端子4から出射するもう一方の光成分は光ファイバー3の残りの一端に入力される。このような構成では、端子3から出射し、光変調器5aで変調された後、測定される光ファイバー3の一端に入力される時計回りの光成分は変調を受け、変調によるサイドバンドが発生する。このサイドバンドを伴った光は、光ファイバー3を伝搬する際群速度分散の影響を受けた後、端子4に入射する。しかし、反時計回りの光成分は光ファイバー3を通過後、変調を受けるので光ファイバー3による群速度分散を受けずに端子3に入射する。これらの端子3および端子4に入射した光は、端子2から出力されるが、これら2つの入射成分は干渉計の端子2から出射する際お互い干渉し合い、時間についての平均出力パワーが、上記の分散による効果で変調周波数に依存することとなる。変調周波数をスキャンしながら、端子2から出射する光の平均出力を光検出器1を用いて測定すれば周期的な構造を持った干渉フリッジが見られる。さらに光源の波長が変わ*

ると、フリッジがシフトする現象が見られる。この現象を用いて、光の波長分散測定することができる。以下に詳細に、これを説明する。

【0014】光路は、図1の様に、光ファイバーL1、光位相調器5a、光ファイバーL2で構成され、時計回りに進む光については添え字として、CWを付けて表し、反時計回りに進む光に付いては、CCWを付けて表すものとする。また、入射光の電場強度を E_i 、光の角速度を ω_0 、時間を t 、光ファイバーL1を光が伝搬する距離を L_1 、角速度 ω_0 の光が光ファイバーL1を伝搬する際の伝搬定数を β_{01} とすると、入射光が時計回りの方向(CW)に進む光については、次の様に表すことができる。

【0015】

【数1】

$$E_{cw}(t) = \frac{E_i}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_0 t)$$

反時計回りの方向(CCW)に進む光については、

【0016】

【数2】

$$E_{ccw}(t) = \frac{iE_i}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_0 t)$$

と分岐される。また、光が光ファイバーL1を伝搬することにより、光の電場は、次のようになる。

【0017】

【数3】

$$E_{cw}(t) = \frac{E_i}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_0 t) \exp(-i\beta_{01} L_1)$$

【0018】この後、この光が、角速度 ω_m 、変調強度 M_1 で、位相変調されると、光の電場は、次のように表される。

【0019】

【数4】

$$E_{cw}(t) = \frac{E_i}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_0 t) \exp(-i\beta_{01} L_1) \exp[iM_1 \cos(\omega_m t)]$$

ここで、 $M_1 \ll 1$ なる領域では、近似的に次の様に展開できる。

※【0020】

※【数5】

$$\exp[iM_1 \cos(\omega_m t)] \approx 1 + iM_1 [\exp(i\omega_m t) + \exp(-i\omega_m t)]/2$$

従って、 $M_1 \ll 1$ なる領域では、位相変調を受けた角速度 ω_0 の光は、角速度 $\omega_0 - \omega_m$ 、と角速度 $\omega_0 + \omega_m$ の2つのサイドバンドが発生する事がわかる。

【0021】これらの光が、光ファイバーL2を伝搬する際の伝搬定数を角速度 ω_0 の光について、 β_{02} とすると、一次近似で、角速度 $\omega_0 - \omega_m$ の光について、 $\beta_{02} - \beta$

、 ω_m 、角速度 $\omega_0 + \omega_m$ の光について、 $\beta_{02} + \beta_{12}$ 、 ω_m 、と近似的に展開できる。ここで、 β_{12} は、 L_2 における光の群速度の逆数に相当する。従って、時計回りに進む光については、近似的に、次の様に表すことができる。

【0022】

【数6】

$$E_{cw}(t) = \frac{E_i}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_0 t - i\beta_{01}L_1 - i\beta_{02}L_2) [1 + iM_1 \cos(\omega_m t - \beta_{12}\omega_m L_2)]$$

【0023】上記と同様の方法で、反時計回りに進む光 * 【0024】
 については、近似的に、次の様に表すことができる。 * 【数7】

$$E_{ccw}(t) = \frac{iE_i}{\sqrt{2}} \exp(i\omega_0 t - i\beta_{01}L_1 - i\beta_{02}L_2) [1 + iM_2 \cos(\omega_m t - \beta_{11}\omega_m L_1)]$$

ここで、 β_{11} は、 L_1 における光の群速度の逆数に相当 10※合成された光の電場強度 E_0 は、次の式で表される。
 する。 【0026】

【0025】これらの光が、光分岐器で合成されると、※ 【数8】

$$\begin{aligned} E_0(t) &= \frac{E_{cw}(t) + iE_{ccw}(t)}{\sqrt{2}} \\ &= \frac{iE_i}{2} \exp(i\omega_0 t - i\beta_{01}L_1 - i\beta_{02}L_2) \\ &\quad \times [M_1 \cos(\omega_m t - \beta_{12}\omega_m L_2) - M_2 \cos(\omega_m t - \beta_{11}\omega_m L_1)] \end{aligned}$$

従って、光強度は、次の様になる。

★【数9】

【0027】

★20

$$E_0(t) \overline{E_0(t)} = \frac{E_i^2}{4} [M_1 \cos(\omega_m t - \beta_{12}\omega_m L_2) - M_2 \cos(\omega_m t - \beta_{11}\omega_m L_1)]^2$$

この光強度の長時間の平均を取ると、次の様になる。 ☆【数10】

【0028】

☆

$$\langle E_0(t) \overline{E_0(t)} \rangle = \frac{E_i^2}{8} \left[(M_1 - M_2)^2 + 4M_1 M_2 \sin^2 \left(\frac{\beta_{12}\omega_m L_2 - \beta_{11}\omega_m L_1}{2} \right) \right]$$

【0029】ここで、 $\omega_m \ll \omega_0$ であるので、また、リ ◆き、数10は、次の式で近似できる。

ング状光路4の光路長 L_1 は、測定される光ファイバー 【0030】

の光路長 L_2 よりも短くて $L_1 \ll L_2$ の関係にあると ◆30 【数11】

$$\langle E_0(t) \overline{E_0(t)} \rangle = \frac{E_i^2}{2} \left[\frac{1}{4} (M_1 - M_2)^2 + M_1 M_2 \sin^2 \left(\frac{\beta_{12}\omega_m L_2}{2} \right) \right]$$

【0031】このため、ここで、端子4から出射する光
 の平均出力を観測しながら ω_m を変えることにより、フ
 リンジが観測される事がわかる。表記を簡単にするた
 め、被測定物に話題を限って、 β_{12} を β_1 、 L_2 を L と書
 くことにすると、その周期 $= f_c$ は、次の式で表され
 る。

【0032】

【数12】

$$f_c = \frac{1}{\beta_1 L}$$

また、数11から光強度が極小となる変調周波数 f
 は、次の式で表わせる。

【0033】

【数13】

$$f_0 = \frac{N}{\beta_1 L} = N \cdot f_c$$

【0034】ここで、 N は正の整数である。通常は、 β_1
 は光の波長の関数であるため、ある一定の値の N にお
 いて、入射光の波長を変えると変調周波数 f も変わる
 ことになる。数13から群速度分散 D が数14のように
 示される。

【0035】

【数14】

$$D = \frac{\Delta \beta_1}{\Delta \lambda} = \frac{-1}{L f_0 f_c} \cdot \frac{\Delta f_0}{\Delta \lambda}$$

【0036】変調周波数をスキャンしながら、出力光を
 光検出器1を用いて検出し、レコーダやコンピュータを
 用いて観測すれば、任意の波長において干渉フリンジが
 50 得られる。例えば N が非常に大きい周波数で変調した場

合でも、干渉フリンジが得られる。次に入射光の波長を $\Delta\lambda$ 変え、同様に交調周波数をスキャンし $\lambda + \Delta\lambda$ 波長での干渉フリンジを得る。波長は $\Delta\lambda$ を変化したことに対して周波数軸上で干渉フリンジのシフトが Δf であれば、群速度分散は、数 14 を用いて得ることができる。

$$\exp[iM_1 \cos(\omega_m t)] = J_0(M_1) + iJ_1(M_1)\exp(i\omega_m t) + iJ_1(M_1)\exp(-i\omega_m t) - J_2(M_1)\exp(i2\omega_m t) - J_2(M_1)\exp(-i2\omega_m t) + \dots$$

同様にして、次の式を得ることができる。

10※【数 16】

【0039】

※

$$\exp[iM_2 \cos(\omega_m t)] = J_0(M_2) + iJ_1(M_2)\exp(i\omega_m t) + iJ_1(M_2)\exp(-i\omega_m t) - J_2(M_2)\exp(i2\omega_m t) - J_2(M_2)\exp(-i2\omega_m t) + \dots$$

これらの近似式を用いて、時計回りと、反時計回りの光を合成した光のパワー P_0 は、次の様に表される。

★【0040】

★【数 17】

$$P_0 = \frac{P_i}{2} \left[\{J_0(M_1) - J_0(M_2)\}^2 / 2 + \{J_1(M_1) - J_1(M_2)\}^2 + 4J_1(M_1)J_1(M_2)\sin^2\left(\frac{\beta_{12}\omega_m L_2 - \beta_{11}\omega_m L_1}{2}\right) + \{J_2(M_1) - J_2(M_2)\}^2 + 4J_2(M_1)J_2(M_2)\sin^2(\beta_{12}\omega_m L_2 - \beta_{11}\omega_m L_1) \right]$$

【0041】ここで、 $\omega_m \ll \omega_0$ であるので、また、光路長 L_1 は光路長 L_2 よりも短くて $L_1 \ll L_2$ の関係にあるとき、上記と同様に被測定物に話題を限って、 β_{12} を β_1 、 L_2 を L と書くことにすると、以下の関係を導くことができる。

☆とができる。

【0042】

【数 18】

$$P_0 = \frac{P_i}{2} \left[\{J_0(M_1) - J_0(M_2)\}^2 / 2 + \{J_1(M_1) - J_1(M_2)\}^2 + 4J_1(M_1)J_1(M_2)\sin^2\left(\frac{\beta_1\omega_m L}{2}\right) + \{J_2(M_1) - J_2(M_2)\}^2 + 4J_2(M_1)J_2(M_2)\sin^2(\beta_1\omega_m L) \right]$$

【0043】この式は、上述の近似で導いた場合と同様

N を正の整数として、数 13 の交調周波数で、極小値を取ることが分かる。この様に、2 種類の近似方法で、同じ結果が得られた。図 2 に、この P_0 についての計算結果を示す。図 2 における、位相交調の交調度は、 $M_1 = 0.3$ 、 $M_2 = 0.2$ および、 $M_1 = 1.8$ 、 $M_2 = 1.4$ の 2 種類である。フリンジの形は、正弦関数の形から少しずれているが、極大点、あるいは極小点に対応する交調周波数が変わらないことが分かる。従って、数 12、数 13、および数 14 は、位相交調度に依存せずに、広い範囲で用いる事ができることが分かる。

【0044】また、上の説明では群速度分散の方法について説明を行ったが、光ファイバーの長さの測定にも図 1 に示した干渉計を用いることができる。数 12 から光ファイバーの長さは、次の式で表わすことができる。

【0045】

【数 19】

$$L = \frac{1}{\beta_1 f_c} = \frac{C}{f_c N_g}$$

【0046】ここで、 C は光速であり、 N_g は光ファイバーの屈折率である。交調周波数をスキャンし、出力に見られる干渉フリンジから f_c の値を導けば、光ファイバーの長さ L を求めることができる。数 11 から分るように、交調周波数をスキャンさせた場合、光強度の長時間の平均 P_0 は図 2 に示されているような正弦関数に類似した干渉フリンジが見られる。時計周り及び反時計周りに対する交調度が同じである場合 ($M_1 = M_2$)、干渉フリンジで出力光は周期的に特定の交調周波数において近似的にゼロになる。しかし、2 つの方向に対する交調度が異なる場合では、干渉フリンジ上最小出力光はゼロまで下らない。

【0047】上記の測定装置および測定方法は、光交調器を含むリング型の干渉計を利用した測定装置および測定方法であったが、他の新しい測定方法としては、楕形

型の干渉計を用いた測定装置および測定方法によっても同様の効果を得る事ができる。この装置は、リング型干渉計の場合に存在する時計及び半時計周りの2つの光成分、線形型の干渉計では同じ光路を通過する直角 (Orthogonal) の偏波を持つ2つ光成分として置き換えたものである。その動作原理を以下に述べる。

【0048】(2) 線形の光路で構成された干渉計を利用した方法

図13に、線形型の干渉計を用いた分散測定装置のブロック図を示す。この干渉計は主に、単一及び波長可変単一モードレーザ光源6a、干渉計に光を入力するまたは取り出すための入出力素子19、偏波調整用素子8a、位相変調器あるいは強度変調器5a、測定される光ファイバー (テストファイバー) 3、ファラデー回転子ミラー30、回転可能偏光子9、光検出器1、及びデータ処理装置50から構成されている。

【0049】ここで、上記の光変調器の軸は、図14a) に示されているように、変調度が極大または極小となるように光変調器のX軸とY軸は入射光の偏波 (H偏光) に対してある角度・ (最適な角度は45度) を持つように調整されている。この傾きによって、レーザ光源からの直線偏波を持つ光は入出力素子を通過し光変調器に入射する際、X及びY軸方向へ偏波成分を持つ2つの光成分1及び光成分2に分けることができる。特に、 $\theta = 45$ 度のとき、光成分1と光成分2は直交関係にあり、光変調器を通過する際に光成分1のみを変調する事ができる。ここで、光成分2はY方向にあるため変調を受けない。図13で、これらの光成分は測定される光ファイバー3を含む光路を通過し、ファラデー回転子ミラー30によって反射し再び位相変調器あるいは強度変調器5aに戻ってくる。図14で、ファラデー回転子ミラー30による偏波面の90度回転のため、光成分1の偏波はXから90度回転してY方向の光成分2とな

または成分2はYから(-X)方向へ向くことによりX方向の光成分1となる。ここで、位相変調器あるいは強度変調器5aを2度目に通過する際、光成分2のみが変調を受けることになる。

【0050】また、光成分1と光成分2が測定される光ファイバー3を通過する際、直角の偏波を持つ2つの光成分のうち光成分1のみが変調によるサイドバンドを持つため、ファイバーの群速度分散の影響を受けることになる。この様に、線形型干渉計の2つの直角の偏波成分は、上に述べたリング型共振器におけるの時計周りの光*

$$E_1(t) = (E_i / \sqrt{2}) \exp(i\omega_m t) \exp[iM_1 \cos(\omega_m t)]$$

ここで、 $M_1 \ll 1$ なる領域では、変調の項を数23の様に近似できる。

$$\exp[iM_1 \cos(\omega_m t)] \approx 1 + iM_1 [\exp(i\omega_m t) + \exp(-i\omega_m t)]/2$$

【0058】これから、位相変調を受けた角周波数 ω の光は、角周波数 $\omega - \omega_m$ 、および $\omega + \omega_m$ と2つのサ

* と反時計回りの光とに相当するものであると考えられる。

【0051】このように、入射光が位相変調器あるいは強度変調器5aを往復した後、光成分1と光成分2のそれぞれの偏波面について45度方向への偏波成分を取り出せば (例えば偏光子9を用いて) これらの光による干渉を観測することができる。上記の分散による効果で、時間についての平均出力が変調周波数に依存することとなるので、変調周波数をスキャンしながら、平均出力を光検出器を用いて測定すれば、周期的な構造を持つフリンジが見られる。さらに、光源の波長が変わる際フリンジがシフトする現象が見られる。これらの現象を用いて、上記の光変調器を含むリング型の干渉計を利用した測定装置および測定方法の場合と同様に、テストファイバーの光波長分散を測定することができる。以下に詳細にこれを説明する。

【0052】図13において光測定される光ファイバー3の長さをL、位相変調器あるいは強度変調器5aに入射する光の電界強度を E_i 、光の角周波数を ω 、時間をt、光テストファイバーを伝搬する際の伝搬係数を β_0 とする。入射光の偏波に対して光変調器の軸X、Yが45度になっているとする。この場合、光変調器に入射する際、光のXおよびY方向へ偏波を持つ光成分の電界を E_1 及び E_2 とすると、これらは数20、数21で表わすことができる。従って、上記の E_{in} を E_1 へ、 E_{out} を E_2 へ、と読みかえる事により、上記と同じ取り扱いができることが分かる。

【0053】

[数20]

$$E_1(t) = (E_i / \sqrt{2}) \exp(i\omega t)$$

【0054】

[数21]

$$E_2(t) = (E_i / \sqrt{2}) \exp(i\omega_m t)$$

【0055】光成分1と光成分2が光変調器を通過する際、光成分1が角周波数 ω 、変調度 M_1 で、位相変調されると、光の電場は数22のように表わされる。しかし、光成分2は変調を受けにくい方向Yにあるため、その変調度は零と見なすことができる。

【0056】

[数22]

※ 【0057】

※ [数23]

イドバンドが発生することが分かる。これらの光が、ファイバーを伝搬する際に伝搬係数を角周波数 ω_0 の光について β_0 とすると、一次近似で、角周波数 $\omega_0 - \omega_m$ の光について $\beta_0 - \beta_1 \cdot \omega_m$ 、角周波数 $\omega_0 + \omega_m$ の光について $\beta_0 + \beta_1 \cdot \omega_m$ 、と近似的に展開できる。ここで、 β_1 はファイバーにおける光の群速度の逆数に相当する。

【0059】光成分1は測定される光ファイバー3を通過し、ファラデー回転子ミラー30によって偏波方向*

$$E_1(t) = (E_i/\sqrt{2}) \exp(i\omega_i t - i2\beta_0 L) [1 + iM_1 \cos(\omega_m t - 2\beta_1 \omega_m L)]$$

【0061】他方、光成分2は、測定される光ファイバー3を通過する時点では、変調サイドバンドが含まれていないため、群速度の影響を受けない。しかし、ファラデー回転子ミラー30によって光の偏波はX方向になり、反射した後、位相変調器あるいは強度変調器5aに※

$$E_2(t) = (E_i/\sqrt{2}) \exp(i\omega_i t - i2\beta_0 L) [1 + iM_2 \cos(\omega_m t)]$$

【0063】従って、図14(b)を参照して、レーザからの入射光の偏波方向Hとそれの直角の偏波方向Vへの E_1 及び E_2 成分は数26、数27のように表わせる。★

$$\begin{aligned} E_H(t) &= (E_1 - E_2)/\sqrt{2} \\ &= (E_i/2) \exp(i\omega_i t - i2\beta_0 L) [iM_1 \cos(\omega_m t - 2\beta_1 \omega_m L) - iM_2 \cos(\omega_m t)] \end{aligned}$$

【0065】

☆☆【数27】

$$\begin{aligned} E_V(t) &= (E_1 + E_2)/\sqrt{2} \\ &= (E_i/2) \exp(i\omega_i t - i2\beta_0 L) [2 + iM_1 \cos(\omega_m t - 2\beta_1 \omega_m L) + iM_2 \cos(\omega_m t)] \end{aligned}$$

これらの強度の時間平均を取ると、数28と数29のようになる。◆

$$\langle E_H(t) \bar{E}_H(t) \rangle = (E_i^2/8) [(M_1 - M_2)^2 + 4M_1 M_2 \sin^2(\beta_1 \omega_m L)]$$

【0067】

☆☆【数29】

$$\langle E_V(t) \bar{E}_V(t) \rangle = (E_i^2/8) [8 + (M_1 + M_2)^2 - 4M_1 M_2 \sin^2(\beta_1 \omega_m L)]$$

【0068】このため、変調周波数 ω_m をスキャンした場合、光変調器の端子4から出射する光のH或いはV方向へ偏波を持つ両成分の平均出力において、図15に示すような正弦関数的なフリンジが見られることがわかる。図15は、変調周波数及び入射光の波長に対する出力の変化を示す図である。

【0069】数28において強度が極小となる条件、または数29において強度が極大になる条件は数30で表わすことができ、その条件での変調周波数を f_c とすれば、 f_c は数31のようになる。

【0070】

【数30】

$$\omega_m \beta_1 L = N\pi$$

*は90度を回転を受け、再び位相変調器あるいは強度変調器5aに反対側のポート5から入射する。このときの光成分1の電界強度 E_1 は数24で表わされる。この光の偏波は、Y方向であるため、位相変調器あるいは強度変調器5aを2回目に通過の際は変調を受けない。このため、位相変調器あるいは強度変調器5aを通過後の E_1 光成分の電場は同じ数24で表わされる。

【0060】

【数24】

※再び入射するとき、今度は変調を受けることになる。この変調度を M_2 とすれば、光変調器を通過後の光の電界強度は数25で表わされる。

【0062】

【数25】

★【0064】

20 【数26】

◆ 【0066】

◆ 【数28】

40

【0071】

【数31】

$$f_c = \frac{N}{2\beta_1 L} = Nf_c$$

ここで、Nは正の実数である。フリンジの周期 f_c は、数32で表わせる。

【0072】

【数32】

$$f_c = \frac{1}{2\beta_1 L}$$

【0073】通常は、 β_1 は光の波長の関数であるため、ある一定の値のNにおいて、入射光の波長を変える

と f 。も変わることになる。数 3 2 から分散係数 D は数 3 3 のように示される。

【0074】

【数 3 3】

$$D = \frac{\Delta\beta}{\Delta\lambda} = \frac{-1}{2L f_0 f_c} \frac{\Delta f_0}{\Delta\lambda}$$

【0075】図 1 3 の光変調器 5 a から、帰路において出射する光の H 方向、或いは V 方向へ偏波を持つ光成分は、出射後の光の光路に置かれた偏光子 9 を通し、その偏光子の角度を調整することによって得られる。H 或いは V 方向へ偏波を持つ光成分を光検出器 1 を用いて検出し、レコーダーやコンピュータを用いて測定すれば、任意の波長、において干渉フリンジが得られる。例えば、 N が非常に大きい周波数で変調した場合でも、干渉フリ

* ンジが見られる。次に入射光の波長を $\Delta\lambda$ 変え、同様に変調周波数をスキャンし、波長 $\lambda + \Delta\lambda$ で干渉フリンジを得る。波長を $\Delta\lambda$ 変化したことに対して周波数軸上で干渉フリンジのシフトが Δf 。であれば、分散パラメータは、数 3 3 を用いて得ることができる。

【0076】上の説明では、変調度 M_1 及び M_2 が小さいものとして説明したが、より高い変調度のときにも、位相変調の効果は数 3 4 及び数 3 5 のように高次のベッセル関数のサイドバンドを含むように表わすことができ、これから、H または V 偏波方向への時間に対する平均出力パワー P_H または P_V は数 3 6 または数 3 7 のように表わせる。

【0077】

【数 3 4】

$$\begin{aligned} \exp[M_1 \cos(\omega_m t)] &\approx J_0(M_1) + iJ_1(M_1) \exp(i\omega_m t) + iJ_1(M_1) \exp(-i\omega_m t) \\ &\quad - J_2(M_1) \exp(2i\omega_m t) - J_2(M_1) \exp(-2i\omega_m t) + \dots \end{aligned}$$

【0078】

※ ※ 【数 3 5】

$$\begin{aligned} \exp[M_2 \cos(\omega_m t)] &\approx J_0(M_2) + iJ_1(M_2) \exp(i\omega_m t) + iJ_1(M_2) \exp(-i\omega_m t) \\ &\quad - J_2(M_2) \exp(2i\omega_m t) - J_2(M_2) \exp(-2i\omega_m t) + \dots \end{aligned}$$

【0079】

★ ★ 【数 3 6】

$$\begin{aligned} P_H &\approx \frac{P}{2} [\{J_0(M_1) - J_0(M_2)\}^2 / 2 \\ &\quad + \{J_1(M_1) - J_1(M_2)\}^2 + 4J_1(M_1)J_1(M_2)\sin^2(\beta_1\omega_m L) \\ &\quad + \{J_2(M_1) - J_2(M_2)\}^2 + 4J_2(M_1)J_2(M_2)\sin^2(2\beta_1\omega_m L)] \end{aligned}$$

【0080】

☆ 30 ☆ 【数 3 7】

$$\begin{aligned} P_V &\approx \frac{P}{2} [\{J_0(M_1) + J_0(M_2)\}^2 / 2 \\ &\quad + \{J_1(M_1) + J_1(M_2)\}^2 - 4J_1(M_1)J_1(M_2)\sin^2(\beta_1\omega_m L) \\ &\quad + \{J_2(M_1) + J_2(M_2)\}^2 - 4J_2(M_1)J_2(M_2)\sin^2(2\beta_1\omega_m L)] \end{aligned}$$

【0081】この式は、上述の近似で導いた場合と同様に、 N を正の実数として、数 3 1 の変調周波数で、数 3 6 において極小、或いは数 3 7 において極大、となることが分かる。

【0082】上に説明した光変調器を含むリング型の干渉計を利用した測定方法、または線形型干渉計を用いる分散測定方法では、変調周波数をスキャンしながら、分散の測定を行う。これらの測定方法ではフリンジを得るための手段として電気的手法を用いることができるので、短時間で測定できるというメリットがある。

【0083】また、コストを低減できる構成例として、機械的機構によりフリンジを得る測定装置の構成が考えられる。この構成では、一定の変調周波数で変調し、基本的には、変調周波数のスキャンを必要としない構成である。この場合の動作概念を図 1 6 を用いて以下に説明

する。この場合、基本的な構成は図 1 3 の構成と類似しているが、位相変調器あるいは強度変調器 5 a 及びファラデー回転子ミラー 3 0 との間に光路長の変な光遅延線 1 4 を用いる点において異なっている。この測定方法の特徴は、この遅延を変えながら分散を測定する事である。

【0084】挿入した光遅延線の光路長を L' とすると、数 3 0 は数 3 8 のように書き換えることができる。

【0085】

【数 3 8】

$$\omega_m(\beta_1 L + L'/c) = N\pi$$

【0086】数 3 8 から一定の角変調周波数 ω_m ($= 2\pi f_m$) において、遅延 L' をスキャンした場合、H または V 偏波成分を持つ光の強度は周期的に変化すること

が分かる。

【0087】数28においてH成分の光強度が極小にある点、あるいは、数29においてV成分の強度が極大なる点の光遅延の長さを、 $L' = L_c'$ 、とすれば、 L_c' は数39のように表わせる。ここで、変調周波数 f_m は一定、または N は正の実数である。

【0088】

【数39】

$$L_c' = c(N/2f_m - \beta_1 L)$$

【0089】図17に示した1フリンジを得るための必要な遅延、 L_c' 、は数40から得られる。

【0090】

【数40】

$$L_c' = c/2f_m$$

【0091】ここで、 β_1 は通常波長の関数であることから、入射波長を変えたとき、 L_c' の値も変化することがわかる。数39から光分散パラメータ D は数41のように表わせる。

【0092】

【数41】

$$D = \frac{\Delta\beta_1}{\Delta\lambda} = -\frac{1}{cL} \left(\frac{\Delta L_c'}{\Delta\lambda} \right)$$

【0093】これと同様に、先に示したリング型干渉計の場合にも、干渉計中に光路長の変な光遅延線を用いれば、機械的に分散測定が可能になる。

【0094】次にファイバの長さの測定あるいは物体までの距離測定を行なうことについて説明する。

【0095】上の説明「(2) 線形の光路で構成された干渉計を利用した方法」では群速度分散測定の方法について説明したが、光ファイバの長さの測定においても13に示した干渉計を用いることができる。数32からファイバの長さは数42の式で表わすことができる。

【0096】

【数42】

$$L = \frac{1}{2\beta_1 f_c} = \frac{c}{2n_g f_c}$$

【0097】ここで、 c は光の速度、 n_g は屈折率 (Group index) である。変調周波数をスキャンし、出力に見られる干渉フリンジからフリンジの周期 f の値を測定すれば、光ファイバの長さ L を求めることができる。

【0098】光変調器からファラデー回転子ミラーまでの光路が、空気あるいは減圧された環境中であれば (例えば、物体の位置にファラデー回転子ミラーをおいて物体までの距離測定の場合がこれに相当する) n_g

の値は1とすればよい。

【0099】次にファイバの長さの変化の測定あるいは物体までの距離の変化の測定を、変調周波数をスキャンして行なうことについて説明する。

【0100】図13において、距離あるいはファイバ長を L とするときその変化 ΔL は数43で示すことができる。

【0101】

【数43】

$$\Delta L = -\frac{N}{2f_0^2 \beta_1} \Delta f_0 = -\frac{1}{2f_0 \beta_1} \left(\frac{\Delta f_0}{f_c} \right)$$

【0102】光変調器からファラデー回転子ミラーまでの光路が空気あるいは減圧された環境中であれば、 $\beta_1 = 1/c$ とすればよい。したがって、長さが変化する場合、フリンジもシフトするので、このフリンジのシフト Δf_0 から長さの変化を求められる。

【0103】次にファイバの長さの変化の測定あるいは物体までの距離の変化の測定を、遅延線をスキャンして行なうことについて説明する。まず、図16において、距離あるいはファイバ長 L の変化 ΔL は数44で示すことができる。

【0104】

【数44】

$$\Delta L = -\frac{1}{c\beta_1} \Delta L_c' = -\frac{\Delta L_c'}{n_g}$$

【0105】光変調器からファラデー回転子ミラーまでの光路が空間であれば、 $\beta_1 = 1/c$ 、 $n_g = 1$ とすればよい。したがって、長さが変化する場合フリンジもシフトするので、このフリンジのシフト $\Delta L_c'$ から長さの変化を求められる。この様に、上に示したリング型干渉計の場合と同様に、長さまたは距離の変化の測定を行なうことができる。

【0106】以下に、測定分解能を上げる方法について説明する。ここで、周波数をスキャンして分散或いは距離の測定を行う場合、フリンジのシフト Δf_0 とフリンジの周期 f_c の比が大きければ大きいほど、測定の誤差が少なくなり、測定精度を上げることができる。

40 【0107】 $(\Delta f_0 / f_c)$ の値は数45で表わせるので、変調周波数が大きくなればなるほど精度が上がるのが分かる。

【0108】

【数45】

$$(\Delta f_0 / f_c) = -2DLf_c(\Delta\lambda)$$

【0109】逆に、光遅延線を調整し、光路長をスキャンして分散或いは距離の変化の測定を行う場合、フリンジのシフト $\Delta L_c'$ 、がフリンジの周期 L_c' 、に比べて大きいほど測定の誤差が少なくなり、測定精度を上げる

ことができる。 $(\Delta L_o' / L_c')$ の値は数46で表わせるので、この場合でも変調周波数が大きくなればなるほど精度が向上するのが分かる。

【0110】

【数46】

$$(\Delta L_o' / L_c') = -2DLf_m(\Delta\lambda)$$

【0111】現在、高周波の光変調器としては、既に数十GHzまでの高帯域の光変調が一般に市販されている。しかし、光通信で使う目的で作られている数十GHzの帯域の光変調器は主に進行波型であるため、順方向の光に対しては変調を掛けられることができるが、逆方向の光には変調がかからなくなる。従って、本発明には、このような光変調器をこのままでは使えない、という問題がある。

【0112】しかし、この問題は、図29(a)および図29(b)に示すように、2つの光変調器を用いて、それぞれの順方向がお互いに逆方向になように直列に接続して、それぞれの変調器に同じ変調信号を供給して変調することにより、両方向に対して変調が得られるようになり解決可能である。

【0113】このように逆方向に繋がれた光変調器の構成は線形の干渉形をもつ測定器だけではなく上記のリング型干渉計の場合にも応用でき、高周波の光変調器を使うようになるので、測定精度を上げる事ができる。

【0114】従って、課題を解決するための手段は、以下のように挙げることができる。まず、請求項1に記載の発明は、上記した原理に基づく構成であり、上記の目的を達成するための光分散測定装置に関しており、光発生手段と、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手段と、該光分岐器の第一端子より入力した光を、複数の光として出力する手段と、該複数の光の内

10

20

30

40

50

【0116】また、請求項3に記載の発明は、光分散測定装置に関しており、光発生手段と、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する構成と、該光分岐器の第一端子より入力した光を、直交関係に有る偏波をもった2つの光成分に変換する手段と、上記の2つの光成分の内一方を被測定物を通過前に変調し、他の一方を被測定物を通過後に変調する構成と、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器に返す構成と、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器の第二端子に出力する構成と、該第二端子から出力された予め決められた偏波にある光を検出する手段と、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付ける手段と、を有することを特徴としている。

【0117】また、請求項4に記載の発明は、光の群速度分散を得るために、上記した請求項1、2あるいは3に記載の光分散測定装置において、波長を変えることのできる光発生手段を備えた事を特徴としている。

【0118】また、請求項5に記載の発明は、上記した請求項1、2あるいは3に記載の発明に加えて、上記の光分岐器を出て、再び上記の光分岐器にもどる光路の光路長を変えることのできる構成を備えた事を特徴としている。

【0119】また、請求項6に記載の発明は、上記した請求項1あるいは2に記載の発明に加えて、光分岐器には、第一端子ないし第四端子があり、その第三端子から第四端子へ向かう光を調整する第一の偏波調整手段と、該第四端子から第三端子へ向かう光を調整する第二の偏波調整手段とを備えたことを特徴としている。

【0120】また、請求項7に記載の発明は、上記した請求項1、2あるいは3に記載の発明に加えて、光路の一部に、被測定物を配置した構成であることを特徴としている。

【0121】また、請求項8に記載の発明は、光分散測定装置における被測定物以外の部分をガス中あるいは減圧したガス中に設置して、その部分における分散を無視できるほど小さくして測定するために、上記した請求項1、2あるいは3に記載の発明に加えて、光路の一部が光反射手段により構成されていることを特徴としている。

【0122】また、請求項9に記載の発明は、被測定物までの距離を測定するために、上記した請求項1、2あるいは3に記載の発明の構成に加えて、光路の一部に配置された被測定物に、光反射手段を配置した構成としたことを特徴としている。

【0123】また、請求項10に記載の発明は、目的とする光路が形成されているか否かを確認するために請求項1あるいは2に記載の光分散測定装置の光路に、90度ファラデー回転子を設けることにより、光分岐器の第二端子からの光の出力を、光が変調を受けた時よりも変調を受けないときの方が大きくならしめるか、あるい

は、光が変調を受けた時よりも変調を受けないときの方が小さくならしめるかしたことを特徴としている。

【0124】また、請求項11に記載の発明は、通常の方法性をもった光変調器の使用を可能ならしめるために、請求項1乃至9に記載の光分散測定装置における少なくとも一対の光変調器は、光変調器の順変調方向がお互いに逆の向きにあることを特徴としている。

【0125】また、請求項12に記載の発明は、光分散測定装置を用いた測定方法に関しており、光発生手段により光を発生させる手続きと、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手続きと、該光分岐器の第一端子より入力した光を、複数の光として出力する手続きと、複数の光の内のすくなくとも2つの光を変調する手続きと、上記の2つの光を該光分岐器に戻す手続きと、該光分岐器に戻された光を該光分岐器の第二端子に出力する手続きと、該第二端子から出力された光を検出する手続きと、上記の光の検出強度を上記の光変調の調周波数に関連付ける手続きと、を有することを特徴としている。

【0126】また、請求項13に記載の発明は、光分散測定装置を用いた測定方法に関しており、光発生手段により光を発生させ、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射し、該光分岐器の第一端子より入力した光を、光分岐器の第三端子および第四端子に出力し、該第三端子から出力された光と、第四端子から出力された光を単一の光路に、進行方向を互いに逆に導き、該光路を通る該第三端子から第四端子へ向かう光と、該光路を通る該第四端子から第三端子へ向かう光とを変調し、上記の変調された第三端子から第四端子へ向かう光と第四端子から第三端子へ向かう光とを該光分岐器の第二端子に出力し、該第二端子から出力された光を検出し、上記の光変調による変調周波数と、第二端子から出力された光の光強度の関係において周期性を見出し、該周期性、上記の第一端子より入力した光の波長に対する依存性から、上記の光路の波長分散特性を取得することを特徴としている。

【0127】また、請求項14に記載の発明は、光分散測定装置を用いた測定方法に関しており、光発生手段により光を発生させる手続きと、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射する手続きと、該光分岐器より出力した光を、直交関係に有る偏波をもった2つの光成分に変換する手続きと、上記の2つの光成分の内の一方を被測定物を通過前に変調し、他の一方を被測定物を通過後に変調する手続きと、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器に戻す手続きと、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器の第二端子に出力する手続きと、該第二端子から出力された予め決められた偏波にある光を検出する手続きと、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付ける手続きと、を有することを特徴としている。

【0128】また、請求項15に記載の発明は、少なくとも4端子を持った光分散測定装置を用いた光路長あるいは光路長の変化の測定方法に関しており、光発生手段により光を発生させ、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射し、該光分岐器の第一端子より入力した光を、光分岐器の第三端子および第四端子に出力し、該第三端子から出力された光と、第四端子から出力された光を実質的に単一の光路に、進行方向を互いに逆に導き、該光路を通る該第三端子から第四端子へ向かう光と、該光路を通る該第四端子から第三端子へ向かう光とを第二端子から出力される光の光強度の関係において見出される周期性の周期以上の周波数を持つ信号で変調し、上記の変調された第三端子から第四端子へ向かう光と第四端子から第三端子へ向かう光とを光分岐器の第二端子に出力し、該第二端子から出力された光を検出し、上記の光変調による変調周波数と、第二端子から出力された光の光強度の関係において周期性を見出し、その周期性を用いて、上記の光路の光路長あるいは光路長の変化を見出すことを特徴としている。

【0129】また、請求項16に記載の発明は、少なくとも3端子を持った光分散測定装置を用いた光路長あるいは光路長の変化の測定方法に関しており、請求項9に記載の発明に加え、光路長の微細な変化を測定するために、光発生手段により光を発生させ、該光発生手段からの光を光分岐器の第一端子へ入射し、該光分岐器より出力した光を、直交関係に有る偏波をもった2つの光成分に変換し、上記の2つの光成分の内の一方を被測定物を通過前に第二端子から出力される光の光強度の関係において見出される周期性の周期以上の周波数を持つ信号で変調し、他の一方を被測定物を通過後に上記の周波数と同じ周波数の信号で変調し、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器に戻し、上記の変調された2つの光成分を該光分岐器の第二端子に出力し、該第二端子から出力された予め決められた偏波にある光を検出して、上述の光の検出強度を上記の光変調の変調周波数に関連付け、その関連性から上記の光路の光路長あるいは光路長の変化を見出すことを特徴としている。

【0130】

【発明の実施の形態】以下にこの発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。図面における符号は、類似の構成あるいは類似の機能を持つものについては、同じ符号を用いて説明する。

【0131】先ず第1の実施形態を、図3を用いて説明する。図3における光分散測定装置300では、光源として波長可変単一モードレーザー光源6aと、反射光のレーザーへの戻りを防止するための光アイソレータ7aと、光の偏波を調整するための偏波調整器8aと、光を分岐するための光分岐器2aと、変調を行うための位相変調器あるいは強度変調器5aと、変調信号を発生する電気発振器13と、ファイバーコネクタ11と、リン

グ状光路4と、測定される光ファイバー3と、光分散測定装置の出力光を測定するための光検出器1と、データを処理するためのデータ処理装置50とから構成されている。測定される光ファイバー3の片側は光変調器と、もう一方は偏波調整器2と光学的に結合されている。波長可変単一モードレーザー光源6a、アイソレータ7a、光分岐器2a、偏波調整器8a及び位相変調器あるいは強度変調器5aは、リング状光路4を介して結合されている。偏波調整器8aは光分岐器2aの端子4と測定される光ファイバー3の間に置く代わりに、位相変調器あるいは強度変調器5aと測定される光ファイバー3の間に置くことも可能である。

【0132】より具体的には、波長可変単一モードレーザー光源6aとして、外部共振型波長可変な半導体レーザー（PHOTONETICS 社、モデル：TUNICS-BT、帯域：1.50 μm ～1.58 μm ）のものを利用して、2.5 nm波長間隔において変調周波数をスキャンし、出射光のフリンジをプロットした。また、光分岐器2aは、4端子の光分岐器（住友大阪セメント製）で、端子1から入力された光を端子3と4に均等に分岐するものである。偏波調整器8aおよび8aは、ディスク型の偏波調整器（IDEA DEVELOPMENT 社、モデル：MPC 1000）である。位相変調器あるいは強度変調器5aは、8 GHz帯域を持つ光位相変調器（UTP社）で、この位相変調器あるいは強度変調器5aの光ファイバービグテイル（Pigtail）は偏波保持型であった。この変調器と、3 GHz周波数付近のスィッチ機能を持つ高周波信号発振器（HEWLETT PACKARD 社、モデル：83620A）を用いて、3.0 GHzから3.001 GHzの周波数範囲をスキャンし、フリンジを測定した。さらに、出射光を測定するための光検出器1は、帯域幅=125 MHz（NEWFOCUS 社、モデル：1811）のものである。

【0133】測定結果の一例を図11に示す。測定される光ファイバーとしてフジクラ製のシングルモード光ファイバー（SMF）で長さ1 kmのものを使用した。位相変調の変調度は、 $M_1=1.65$ 、 $M_2=0.9$ である。図11では、波長1545 nm、1550 nmおよび1555 nm、の3種類の入射光の場合について、3000 MHzから3001 MHzまで変調周波数を掃引した時の光分散測定装置からの出力パワーを、周波数の関数として示したものである。上記位相変調の掃引時間は、100 ミリ秒である。この構成においては、光が変調されない場合、干渉計からの出力パワーは殆ど無い。ここで、数13におけるNの値が同じ極点に当たる点に黒丸を付した。この測定結果から、正弦波的なフリンジが得られ、光の波長に依存してこのフリンジがシフトすることが分かる。波長=1550 nmにおいては、光出力変動の変調周波数に対する変動周期は、199 kHz

であり、また、入射光の波長が1545 nmから1555 nmに変化したときのフリンジのシフトは-98 kHzであった。この結果から、数14を用いて、中心波長=1550 nmにおける群速度分散として、 $D=16.41 \text{ ps/nm/km}$ が得られた。これは、他の位相シフト法による測定値 $D=16.65 \text{ ps/nm/km}$ と非常によく一致しており、正しく測定されていることが分かる。

【0134】以上説明した様に、従来のパルス遅延法、位相シフト法またはベースバンドエーエムレスポンス（Baseband AM Response）法を用いて群速度を測定する際、広い周波数帯域（数GHzから数十GHz）を持つ光検出器やオシロスコープやネットワークアナライザなどが必要であったが、本発明の光分散測定装置の主な構成要素は、波長可変な半導体レーザー、ディスク型の偏波調整器、光位相変調器、電気発振器、光検出器、データ処理装置であり、従来の装置に比べ簡単な構成の装置になっており、光分散測定装置のコストを削減できた。

【0135】以上の説明では、光変調器として光位相変調器を用いたが、位相変調の代わりに強度変調を行っても、位相変調と同様のサイドバンドを得ることができることから、光位相変調器の代わりに強度変調器を用いることも可能である。また、周波数変調器を用いて変調しても良く、例えば、図30(a)あるいは図30(b)に示されているような一次回折を利用した音響光学変調器（すなわち、音響光学周波数シフター）を用いることも可能である。この場合、音響光学変調器への電気信号の周波数をスキャンすれば、出力光では同じく干渉フリンジが見られる。さらに、光の波長を変えた場合、光ファイバーの群速度分散の影響でフリンジがシフトすることになる。Lを光ファイバー長、f₀をシフターに加える電気信号の周波数、波長の微小変化 $\Delta\lambda$ だけ変化したことに対して周波数軸上で干渉フリンジのシフトが Δf であれば、群速度分散を、数14の関係をj
て得ることができる。

【0136】また、上記の説明では、光分岐器として端子3と4に1:1の割合で光強度を分岐するものであった。本発明の光分散測定装置では、この割合のものが最適であるが、他の分岐率を持つものを利用した場合でも、上記のフリンジが観測できるものであれば、この方法が適用できることは明らかである。

【0137】次に、第二の実施形態を図4に示す。図4に示す光分散測定装置400は、主に、光源として波長可変単一モードレーザー光源6a、反射光のレーザーへの戻りを防止するための偏波保持型光アイソレータ7c、光の偏波を調整するための偏波調整器8a、光を分岐するための4端子偏波保持型光分岐器2b、変調を行うための偏波保持型位相変調器または強度変調器5c、変調信号を発生する電気発振器13、ファイバーコネクター

11、リング状光路4b、測定される光ファイバー3、光分散測定装置の出力光の検波用光検出器1で構成されている。測定される光ファイバー3の片側は位相変調器または強度変調器5aと、もう一方は偏波調整器8aと光学的に結合する。電気発振器13は位相変調器または強度変調器5cの駆動のため用いる。光源6a、アイソレータ7a、偏波保持型光分岐器2b、及び位相変調器または強度変調器5aはリング状光路4bを介し結合されている。偏波調整器8aは偏波保持型光分岐器2bの端子4と測定される光ファイバー3の間に置かわりに、位相変調器または強度変調器5aと測定される光ファイバー3の間に置くことも可能である。

【0138】この第二の実施形態における構成は、上記の第一の実施形態における構成と比較して、偏波保持型光分岐器2bと1つの偏波調整器8aとリング状光路4bを用いている点に特徴があり、偏波調整器の数を減らすことができる構成である。

【0139】次に、第三の実施形態を図5に示す。図5に示す光分散測定装置500は、主に、光源として波長可変単一モードレーザー光源6a、反射光のレーザーへの戻りを防止するためのバルク型の光アイソレータ7b、光の偏波を調整するためのバルク型の偏波調整器8b、光を2つの成分に分岐するためのビームスプリッタ20、変調を行うためのバルク型の位相変調器または強度変調器5b、変調信号を発生する電気発振器13、測定される光ファイバー3、光分散測定装置の出力光の検波用光検出器1で構成されている。光源6a、アイソレータ7b、ビームスプリッタ20、位相変調器または強度変調器5b、偏波調整器8bを結合する光路4aは空气中に配置されている。位相変調器または強度変調器5bから出射する時計回りの光はファイバーケーブル10を用いて測定される光ファイバー3に入射する。偏波調整器8bから出射する反時計回りの光は光ファイバーケーブル10を用いて測定される光ファイバー3のもう一方の端子に入射する。偏波調整器8bはビームスプリッタ20と測定される光ファイバー3の間に置く代わりに、位相変調器または強度変調器5bと測定される光ファイバー3の間に置くことも可能である。

【0140】この第三の実施形態の特徴は、光路4aを空气中に設けることにより、この部分の分散特性をほぼ無視できることにある。

【0141】上記の第一、第二、および第三実施形態に示した構成では、光ファイバーの分散を測定する際に測定される光ファイバーの両端を測定器まで持ってくる必要がある。ところが、すでに敷設されている光ファイバーの場合には、片端しか測定器につなぐ事が出来ない場合が多い。このような場合は、上記の実施形態で示した測定装置構成では、測定が困難である。この困難を解決するためのひとつの方法として、図6に示す第四の実施形態がある。図6は、被測定物の一端に光反射手段である

ファラデー回転子ミラーを設ける事によって、測定器に光ファイバーの一端のみを接続して測定する様にした構成を示す図である。

【0142】図6に示す光分散測定装置600では波長可変単一モードレーザー光源6a、偏波保持型光アイソレータ7c、偏波保持型光分岐器2b、偏波保持型光位相または強度変調器5cを利用し、これらを偏波保持型の光ファイバー4bを用いて光学主軸を合わせて接続する。また、光変調器5cは偏波面ビームスプリッタ28aの一つ目の光ファイバー端子5と光学主軸を合わせ接続する。偏波保持型分岐器2bの端子4は偏波面ビームスプリッタ28aの二つ目の光ファイバー端子6と光学主軸を90度回した状態での接続（融着）21する。ビームスプリッタ28aの三つの光ファイバー端子7は光ファイバーコネクタ-11を用いて測定される光ファイバー3と光学接続する。測定される光ファイバー3のもう一方の端子はファラデー回転子ミラー30と光学接続する。このような構成では、光分岐器2bによって分岐される時計回り及び反時計回り両方の光成分は、偏波面ビームスプリッタ28aによって測定される光ファイバー3を一往復し、再び偏波保持型光分岐器2bの端子4及び端子3に戻るようになる。時計回りの光成分は変調を受けてから測定される光ファイバー3を往復するのに対し、反時計回りの光成分は測定される光ファイバー3を往復した後、変調を受けることになる。したがって、この構成においては、測定される光ファイバー3の長さとしてある場合にそのファイバーに関する光路長は実質的に2×Lとなる。ここで、測定される光ファイバー3の長さLは光分散測定装置リング4bやそれに付随する他の部分より十分長ければ、群速度分散は、数33で表される。

【0143】また、光変調器5cは光分岐器2bの端子3と偏波面ビームスプリッタ28aの間に置かわりに光分岐器2bの端子4と90度接続（融着）21の間にも置くことも可能である。この場合、反時計回りの光は時計回りの光より先に変調を受けることになる。

【0144】図6に示した構成では光変調器5cにより光が変調されていない場合の偏波保持型光分岐器2bの第二端子からの光出力は、入射された光が光路の損失を受けるのみで、変調によりフリッジが出現するが、光学主軸を90度回した状態での接続（融着）21を図12に示す光回路で置きかえる事により、光変調器5cにより光が変調されていない場合の偏波保持型光分岐器2bの第二端子からの光出力を、相対的に大から相対的に小に、あるいはその逆に切り替えることができる。

【0145】図12(a)に示した様に、半波長板の光学軸が偏波に対して平行あるいは直角である場合は、半波長板52の回転の効果がない。しかし、90度ファラデー回転子51により時計回り及び半時計回りの光が同じ方向へ90度回転するため、これらの光は、リングを

通過することができ、通過後は、偏波保持型光分岐器 2 b の第二端子から出力されることとなる。このとき、光変調器 5 c により光が変調されていない場合において、偏波保持型光分岐器 2 b の第二端子からの光は相対的に最大から最小にすることができるようになる。この手段をもちいることによって、検出信号の DC 成分を除去することができ、その DC 成分による検出器の飽和の問題がなくなる。

【0146】また、図 12 (b) に示した様に、半波長板の光学軸が偏波に対して 45 度である場合は、半波長板 5 2 は光の偏波を 90 度回転する。このとき、図 12 (b) のポート 2 から入射した CCW の光の横偏波は半波長板とファラデー回転子ミラーとで 2 回、偏波の回転を受け、光分散測定装置 600 のリングに含まれている偏波面ビームスプリッタ 28 a によって消滅してしまう。しかし、図 12 (b) のポート 1 から入射する CW の光の縦偏波は、ファラデー回転子ミラー、及び半波長板 5 2 を通過した後、また縦偏波となり、偏波保持型光分岐器 2 b の第二端子から出力する。この出力は、上記の様に CCW の光部分がすでに消えているので、干渉せず、一定の強度で出力され、これは、変調を加えても変わらない。この様に、半波長板を回転することにより、容易に、光変調器 5 c により光が変調されていない場合の偏波保持型光分岐器 2 b の第二端子からの光出力を、相対的に大から相対的に小に、あるいはその逆に切り替えることができる。この様な装置によれば、光路の欠陥をすばやく見つけることが可能となり、また、光の検出感度が損なわれることがない。

【0147】次に第五の実施形態として、図 7 に示した光分散測定装置 700 を説明する。この光分散測定装置 700 の特徴は、上記の第四の実施形態に類似の構成であるが、光の入射、出射が共に空間であるバルク型の光位相または強度変調器 5 b を用いている点と、光路の一部が空气中に設置されている点である。また、アイソレータ 7 b としてバルク型のもの、光変調器としてバルク型の光位相または強度変調器 5 b、バルク型のビームスプリッタ 20 及びバルク型の偏波面ビームスプリッタ 28 b を用いている点にも特徴がある。これらの素子を接続する光路 4 a は空气中に設置される。図 6 で示した 90 度接続（融着）の効果と同様の効果を得るために、この実施形態においてもバルク型の半波長板 27 を用いる。さらに、バルク型偏波面ビームスプリッタ 28 b からの光を測定される光ファイバー 3 に入れるため光ファイバーカプラー 10 を用いる。光変調器 5 b はビームスプリッタ 20 と半波長板 27 の間に置くことも可能である。この場合、反時計回りの光は時計回りの光より先に変調を受けることになる。この構成 700 における、利点としては、空气中の光路 4 a は、光ファイバーによる通信に用いられる光の波長域においては、殆ど分散を示さず、この光路の分散を無視する事ができる点である。

【0148】以上の実施形態では、群速度分散を測定するものであったが、本発明の光分散測定装置の測定方法とはほぼ同様の測定方法により、光ファイバーの長さや、離れた物体までの距離測定にも利用できる。この測定方法を用いた実施形態について以下に説明する。

【0149】次に、第六の実施形態として、図 8 に示した距離を測定するための光分散測定装置 800 を説明する。光分散測定装置 800 は主に、光源として単一モードレーザ光源 6 b、反射光のレーザへの戻りを防止するためのバルク型の光アイソレータ 7 b、光を 2 つの成分に分岐するためのビームスプリッタ 20、変調を行うためのバルク型の位相変調器あるいは強度変調器 5 b、光を反射するためのレトロリフレクター 40、光分散測定装置の出力光の検波用光検出器 1 から構成されている。光源 6 b、アイソレータ 7 b、ビームスプリッタ 20、光変調器 5 b、を結合する光路 4 a は空气中に設置されている。時計周り及び反時計周りの光ビームはお互い平行状態で物体まで伝搬し、物体の位置においたレトロリフレクター 40 を用いて再び戻し、リング干渉計である光分散測定装置 800 を構成する。

【0150】この構成で、物体までの距離 L は、次の様にして求めることができる。距離 L が上記のリング干渉計の他の部分より十分長いのであれば、C を空气中での光の速度として、長さ L は以下の数式から求められる。

【0151】

【数 47】

$$L = \frac{1}{2\beta_1 f_c} = \frac{C}{2f_c}$$

【0152】従って、変調周波数をスキャンして得られる干渉フリンジからフリンジの周期 = f_c を求めれば、距離 L の測定が可能となる。

【0153】次に、第七の実施形態として、図 9 に示した距離を測定するための光分散測定装置 900 を説明する。光分散測定装置 900 では主に、単一モードレーザ光源 6 b、偏波保持型光アイソレータ 7 c、偏波保持型光分岐器 2 b、偏波保持型光位相あるいは強度変調器 5 c を利用し、偏波保持型の光ファイバー 4b を用いて光学主軸を合わせて接続する。また、光変調器 5 c は偏波面ビームスプリッタ 28 a の一つ目のファイバー端子 5 と光学主軸を合わせ接続する。光分岐器 2 b の端子 4 は偏波面ビームスプリッタ 28 a の二つ目の光ファイバー端子 6 と光学主軸を 90 度回した状態での接続（融着）21 する。ビームスプリッタ 28 a の三つ目の光ファイバー端子 7 からの光を平行光線にするためレンズ 22 を用いてコリメートして物体まで伝搬させ、物体の位置におかれたファラデー回転子ミラー 30 によって反射させ、再びレンズ 22 に戻す。このような構造上では、光分岐器 2 b によって分岐される時計回り及び反時計回り両方の光成分は偏波面ビームスプリッタ 28 によって物体ま

で一回往復を行い、再び光分岐器2bの端子4及び端子3に戻るようになる。物体までの距離Lはリング干渉計である光分散測定装置900の他の部分より十分長いのであれば、距離Lは、数47により求めることができる。また、光変調器5cは光分岐器2bの端子3と偏波面ビームスプリッタ28aの間に置く代わりに光分岐器2bの端子4と90度接続（融着）21の間にも置くことも可能である。この場合、反時計回りの光は時計回りの光より先に変調を受けることになる。

【0154】この実施形態で、距離を計測する利点は、時計回りに伝搬する光と、反時計回りに伝搬する光とが、交じり合うことが無いため、実施例6の方法に比べて、干渉フリンジを容易に得ることができる点にある。

【0155】次に、距離を測定するための第八の実施形態を、図10に示す。図10の干渉計である光分散測定装置1000のようにバルク型の光素子を用いても本発明の光分散測定装置を構成することは可能である。光分散測定装置1000において、アイソレータ7bとしてバルク型のもの、光変調器としてバルク型の位相変調器または強度変調器5b、バルク型のビームスプリッタ20及びバルク型の偏波面ビームスプリッタ28bを用いる。これらの素子を接続する光路4aは空気中に設けられている。図6で示した90度接続（融着）と同様の効果を得るためにバルク型の半波長板27を用いる。偏波面ビームスプリッタ28bの端子7からの光はレンズ22を用いてコリメートし物体まで伝搬させ、物体の位置におかれたファラデー回転子ミラー30によって反射させ再び装置に戻す。物体までの距離Lは、リング干渉計である光分散測定装置1000の他の部分より十分長いのであれば、距離Lは、数47により求めることができる。また、光変調器5bはビームスプリッタ20と半波長板27の間に置くことも可能である。この場合、反時計回りの光は時計回りの光に比べて先に変調を受けることになる。この実施形態の利点は、上記第七の実施形態の利点と同様に、実施例6の方法に比べて、干渉フリンジを容易に得ることができる点にある。

【0156】次に第九の実施形態として、距離の変化を測定する例について述べる。図10の構成では、数47から、距離の変化は、次の式で表されることが分かる。

【0157】

【数48】

$$\Delta L = -\frac{N}{2f_0\beta_1} \Delta f_0 = -\frac{1}{2f_0\beta_1} \left(\frac{\Delta f_0}{f_c} \right)$$

【0158】空気中では、概略 $\beta_1 = 1/C$ であり、上記のNを大きくとって、つまり変調周波数を非常に高くして変調することにより、 ΔL を非常に小さくできる。例えば、 $\Delta f_0/f_c = 1/100$ を検知することは容易であるから、3GHzで位相変調する場合、 ΔL として0.5mmの検出が可能である。変調周波数に反比

例して、検出可能な ΔL を小さくすることができる。この方法における利点は、検出可能な ΔL の大きさはLの大きさによらない点である。従って、原理的には長距離になるほど精度が向上し、例えば10kmの距離を計測する場合では、 5×10^{-6} の精度になる。

【0159】また、通常の変距儀において用いられているものと同様に、複数の変調周波数で測定し、その結果を組み合わせることによっても、本発明の測定精度を向上することは容易である。

10 【0160】次に第十の実施形態として、図18に示した例を説明する。図18に示す装置は、波長可変の単一モードレーザ光源6a、入出力手段として偏波保持型光サーキュレーター15、偏波保持型位相変調器あるいは強度変調器5c、測定される光ファイバー3、ファラデー回転子ミラー30、回転可能偏光子9、および光検出器1等から構成されている。

20 【0161】光源からのレーザ光は、その偏波面がファイバーの主軸方向に合わされた状態で偏波面保持型光ファイバー4bに入射される。測定される光ファイバー3の片側は位相変調器あるいは強度変調器5cともう一方はファラデー回転子ミラー30と結合する。光サーキュレーター15によってポート1から入射する光は2から出射し、光変調器に入射される。光変調器の4ポートから出射する光は光サーキュレーター15のポート2から入り、ポート3から出射する。

30 【0162】電気発振器13は位相変調器あるいは強度変調器5aを駆動するために用いる。光サーキュレーター15及び位相変調器あるいは強度変調器5aの間でファイバーの主軸を45度を回転した状態の接続（融着）23を用いる。これによって位相変調器あるいは強度変調器5cに入射する光を、効率よく光変調されるX軸方向の光と、その直角方向で殆ど変調されないY方向の光と、同じ強度の2つ成分に分けることができる。回転可能な偏光子9は出力光のHとV方向を選択するために用いる。また、データを処理するためデータ処理装置50を用いる。

40 【0163】次に第11の実施形態として、図19に示した線形型の干渉計を用いた測定装置について説明する。図19に示した測定装置においては、干渉計への光入出力手段として光サーキュレーターの代わりに偏波面スプリッター28aを用いるものである。図19上ではポート1から水平偏波Hの光が入射し垂直の偏波Vの光成分をポート3から取り出す。この場合図18の偏光子9を用いる必要がなく、ポート3からの光の平均出力が、数29の $\langle E_v(t) * E_v(t) \rangle$ 、或いは数37の P_v に相当する。

50 【0164】偏波保持型位相変調器あるいは強度変調器5cへの入射する光の偏波を調整するには、図19に示した様に偏波保持ファイバー4bの主軸を図18の構成と同様に45度で融着23するか、図20に示した様に

偏波調整器8aを用いるか、あるいは、図21に示した様に45度ファラデー回転子53を用いるか、のどの方法によっても調整することができる。

【0165】ここで、45度ファラデー回転子53を用いる場合、これにより光成分1と光成分2は往復でさらに90度の回転を受けることから、光平均出力が、数28の $\langle E_n(t) * E_n(t) \rangle$ 、或いは数36の P_n 、と等しくなる。

【0166】図22(a)および(b)は図20に示した実施例の構成を用いて行ったファイバー分散測定の例を示す。光変調器としてRAMAR社の20GHz帯域の位相光変調器を用いて3.0GHz付近で変調を行った。図22(a)は光波長1545nm、1550nm、1555nmのとき得られたフリンジを示す。ファイバーは通常のシングルモードファイバーで、長さは1.0kmであった。図22(b)では1550nmのフリンジに対して他の波長でのフリンジのシフトを示す。また、図22(b)では数33から導いた波長に対してファイバーの分散の変化を示している。

【0167】次に第12の実施形態として、図23に示した線形型の干渉計を用いた測定装置について説明する。干渉計への光入出力手段として図23の光分岐器(3dBカブラ)2bを用いることも可能である。この光分岐器によってポート1から入射する光は2から出射し、偏波保持型位相変調器あるいは強度変調器5cに入射される。位相変調器あるいは強度変調器5cの4ポートから出射する光は光分岐器のポート2から入り、ポート3から出射する。

【0168】上記の第10の実施形態と比べると、本実施形態では光分岐器2bを用いる点に特徴があり、このため、光路を伝搬する光は、行きと帰りに光分岐器を通過する際に合計6dBの損失になる。しかし、一般に、光分岐器(3dBカブラ)は安価であるため、光分岐器を用いることにより製造コストを削減することができる。ここで、回転可能偏光子9は出力光のHとV方向を選択するために用いる。

【0169】次に第13の実施形態として、図24に示した線形型の干渉計を用いた測定装置について説明する。この干渉計は図24のようにバルク形の素子を利用して構成した点に特徴がある。特に、入出力素子として光ビームスプリッタ20、また、バルク型の位相変調器あるいは強度変調器5bへ入射する光の偏波の調節のため半波長板52を用いた点に特徴がある。

【0170】次に第14の実施形態として、図25に示した線形型の干渉計を用いた目標とする物体までの距離の測定装置について説明する。偏波保持型位相変調器あるいは強度変調器5cのポート5からの出射光をコリメーター18を用いて空間中を伝搬させ、物体に置かれたファラデー回転子ミラー30を用いて再び同じ光路を

ポート5に戻す。図19、図20、図21、図23、或いは図24の実施例に示した装置も同様に距離測定に用いることができる。

【0171】次に第15の実施形態として、図26に示した線形型の干渉計を用いた、目標とする物体までの距離測定装置について説明する。光路長を機械的にスキャンしながら測定を行うための構成を図26に示す。図26では、位相変調器あるいは強度変調器5aとファラデー回転子ミラー30の間に光路長の可変な光遅延線14を用いて光路長を可変にしている。

【0172】光路長を機械的にスキャンしながら被測定物の光学特性や距離の測定を行なうことは、上述のリング型の干渉計においても可能である。このためには、図27、図28に示したように、リング型の光路の一部に光遅延線を挿入した構成を用いればよい。

【0173】次に、光路の双方向へ向かう光を数十GHz程度の高周波数で変調を行うための光変調器の構成を図29(a)と図29(b)に示す。図29(a)では、2つの光変調器の順方向がお互いに向き合う様に直列に配置されており、図29(b)では2つの光変調器の順方向がお互いに逆方向になるように直列に配置されている。ここで、それぞれ2つの光変調器としては、同じ特性の光変調器と、同じ変調信号を用いて変調することにより、両方向に対して等しい変調特性を得ることが可能である。図29(a)及び図29(b)に示す二つの変調器を繋ぐファイバーの分散の影響を無くするため、その繋ぐファイバー長さは短い方が望ましい。また、より効率的な構造として、2つの変調器を電気光学材料を用いた光集積回路に組み込むことも考えられる。

【0174】上記の様に、本発明の方法により、高価な測定装置を用いることなく、距離、あるいは距離の変化を精度良く計測できるようになった。

【0175】

【発明の効果】この発明は上記した構成からなるので、以下に説明するような効果を奏することができる。

【0176】請求項1および2に記載の発明では、光の検出強度と変調周波数との関連を測定することにより、従来の装置に比べ簡単な構成の装置で、光分散を測定できるようになった。

【0177】請求項3に記載の発明では、直交関係に有る2つの成分に分けることによって、リング状の光路ではなく、直線状の光路を用いて、光分散を測定できるようになった。

【0178】また、請求項4に記載の発明では、請求項1、2あるいは3に記載の発明に加え、波長を変えることのできる光発生手段を備えた事の特徴とする構成にしたので、光分散を測定できるようになった。

【0179】また、請求項5に記載の発明では、請求項1、2あるいは3に記載の発明に加え、光路長を変えることにより測定できる構成にしたので、装置の製造コス

トを低減することができるようになった。

【0180】さらに、請求項6に記載の発明では、請求項1、2あるいは3に記載の発明に加え、偏波調整手段を活用したので、光路に偏波保持光ファイバーを使う必要がなくなった。

【0181】さらに、請求項7に記載の発明では、1、2あるいは3に記載の発明に加え、被測定物を交換することができるようになった。

【0182】さらに、請求項8に記載の発明では、干渉計における被測定物以外の部分をガス中あるいは減圧したガス中に設置することができるようになり、干渉計における被測定物以外の分散を無視できるほど小さくして測定することができるようになった。

【0183】さらに、請求項9に記載の発明では、請求項1に記載の光路の一部に配置された被測定物に光反射手段を配置した構成としたことを特徴とする構成にしたので、距離の測定ができるようになった。

【0184】さらに、請求項10に記載の発明では、光分岐器の第二端子からの光の出力を、光が変調を受けていないときの光分岐器の第二端子からの光の出力を、相対的に大あるいは相対的に小と、から選択できる様になった。これにより、測定装置の調整が容易になった。

【0185】さらに、請求項11に記載の発明では、両方向の光に対して等しい変調特性を得ることが可能になった。

【0186】さらに、請求項12、13および14に記載の発明では、光の検出強度と変調周波数との関連を測定するそれぞれの方法が開示されたことにより、従来の装置に比べそれぞれ簡単な構成の装置で、光分散を測定できるようになった。

【0187】さらに、請求項15及び16に記載の発明では、光路長と光路長の変化の測定が高精度でできるようになった。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の提案する新しい光分散測定方法の動作概念を示す図である。

【図2】本発明の提案する新しい光分散測定およびその測定方法により得られる光強度と変調周波数との関係の数値計算結果の一例を示す図である。

【図3】第一の実施形態を説明するための図である。

【図4】第二の実施形態を説明するための図である。

【図5】第三の実施形態を説明するための図である。

【図6】第四の実施形態を説明するための図である。

【図7】第五の実施形態を説明するための図である。

【図8】第六の実施形態を説明するための図である。

【図9】第七の実施形態を説明するための図である。

【図10】第八の実施形態を説明するための図である。

【図11】本発明の構成による、光ファイバについての測定結果を示す図である。

【図12】光変調器5cにより光が変調されていない場

合の偏波保持型光分岐器2bの第二端子からの光出力を、相対的に大から相対的に小に、あるいはその逆に切り替える構成を示す図であり、(a)は、半波長板を一端に回転した図で、(b)は、半波長板を他端に回転した図である。

【図13】線形型の干渉計を用いた分散測定装置のブロック図を示す。

【図14】光変調器の軸と入射光の偏波の方向との関連を示す模式図である。

10 【図15】変調周波数 ω_m をスキャンした場合、光変調器から出射する光のH或いはV方向へ偏波を持つ両成分の平均出力の例を示す図である。

【図16】機械的機構によりフリンジを得る測定装置の構成を示すブロック図である。

【図17】光遅延線の長さ及び入射光の波長に対する出力の変化を示す図である。

【図18】第10の実施形態を説明するためのブロック図である。

20 【図19】第11の実施形態を説明するためのブロック図である。

【図20】光変調器の入射する光の偏波を調整する手段を設けたブロック図である。

【図21】光変調器の入射する光の偏波を調整する手段を設けたブロック図である。

【図22】光変調器の入射する光の偏波を調整する手段を設けた構成を用いて行ったファイバ分散測定の例を示す図で、(a)は光波長1545nm、1550nm、1555nmのとき得られたフリンジを示す図で、(b)は1550nmのフリンジに対して他の波長でのフリンジのシフト及び波長に対する分散変化を示す図である。

30 【図23】第12の実施形態を説明するためのブロック図である。

【図24】第13の実施形態を説明するためのブロック図である。

【図25】第14の実施形態を説明するためのブロック図である。

【図26】第15の実施形態を説明するためのブロック図である。

40 【図27】リング型の干渉計において、光路長を機械的にスキャンしながら被測定物の光学特性や距離の測定を行なう構成を示すブロック図である。

【図28】リング型の干渉計において、光路長を機械的にスキャンしながら被測定物の光学特性や距離の測定を行なう構成を示すブロック図である。

【図29】光路の双方向へ向かう光を数十GHz程度の高周波数で変調を行うための光変調器の構成を示すブロック図で、(a)は2つの光変調器の順方向がお互いに向き合う様に直列に配置した構成を示す図で、(b)では2つの光変調器の順方向がお互いに逆方向になるよ

うに直列に配置した構成を示す図である。

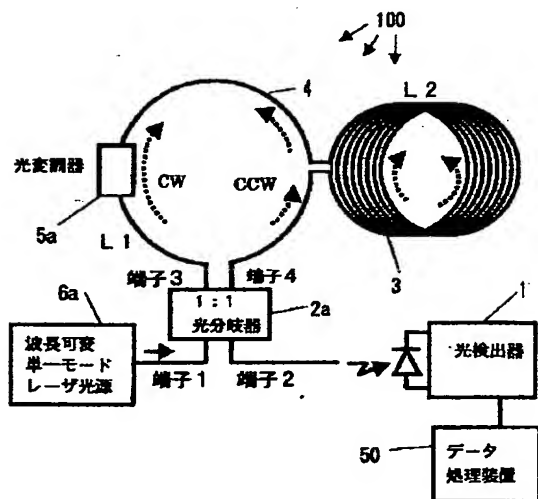
【図30】周波数変調器を行なうための一次回折を利用した音響光学変調器（すなわち、音響光学周波数シフター）を示す図である。

【符号の説明】

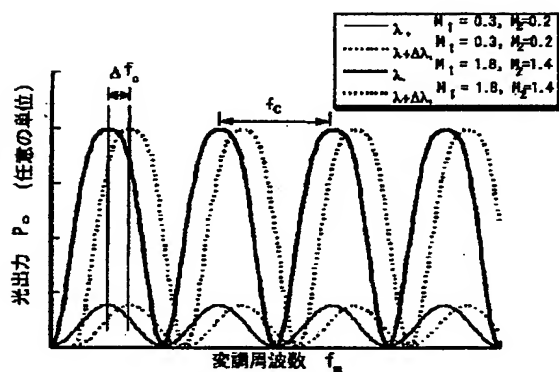
- 1 光検出器
- 2 a 光分岐器
- 2 b 偏波保持型光分岐器
- 3 測定される光ファイバー
- 4 リング状光路
- 4 a 空気中に設置された光路
- 4 b 偏波保持型の光ファイバー
- 5 a 位相変調器あるいは強度変調器
- 5 b バルク型の位相変調器あるいは強度変調器
- 5 c 偏波保持型位相変調器あるいは強度変調器
- 6 a 波長可変単一モードレーザー光源
- 6 b 単一モードレーザー光源
- 7 a 光アイソレータ
- 7 b バルク型の光アイソレータ
- 7 c 偏波保持型光アイソレータ
- 8 a、8 a a 偏波調整器
- 8 b バルク型偏波調整器
- 9 回転可能偏光子
- 10 ファイバーカプラー
- 11 ファイバーコネクタ

- * 13 電気発振器
- 14 光路長の変な光遅延線
- 15 光サーキュレーター
- 16 光ファイバー
- 17 終端器
- 18 光コリメータ
- 19 入出力端子
- 20 ビームスプリッター
- 21 光学主軸を90度回した状態での接続（融着）
- 22 レンズ
- 23 光学軸を45度回転した状態での接続（融着）
- 25 反射鏡
- 27 バルク型の半波長板
- 28 a 偏波面ビームスプリッター
- 28 b バルク型の偏波面ビームスプリッター
- 30 ファラデー回転子ミラー
- 40 レトロリフレクター
- 20 50 データ処理装置
- 51 90°ファラデー回転子
- 52 半波長板
- 53 45度ファラデー回転子
- 100、300、400、500、600、700、800、900、1000 光分散測定装置

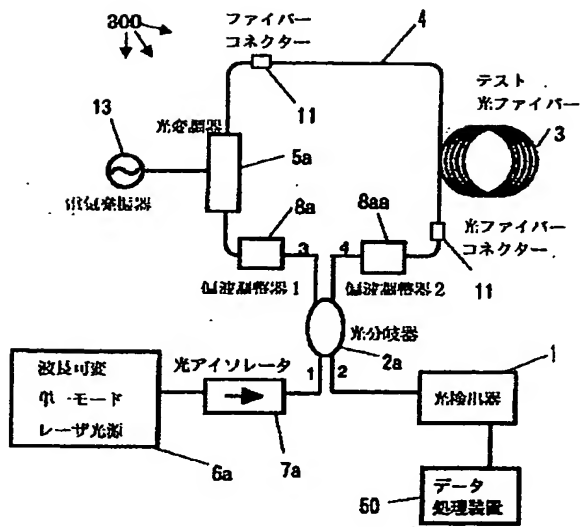
【図1】



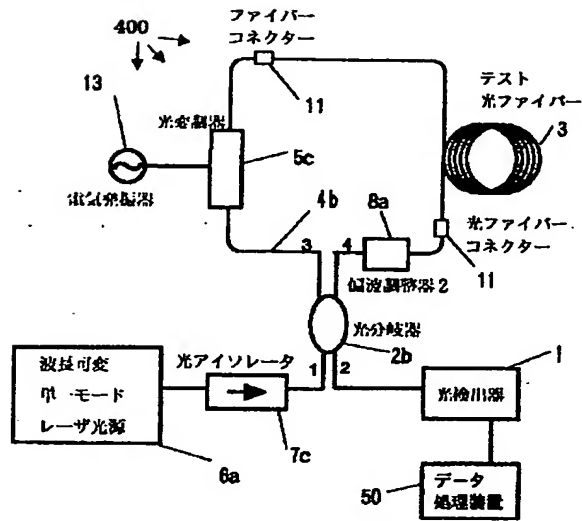
【図2】



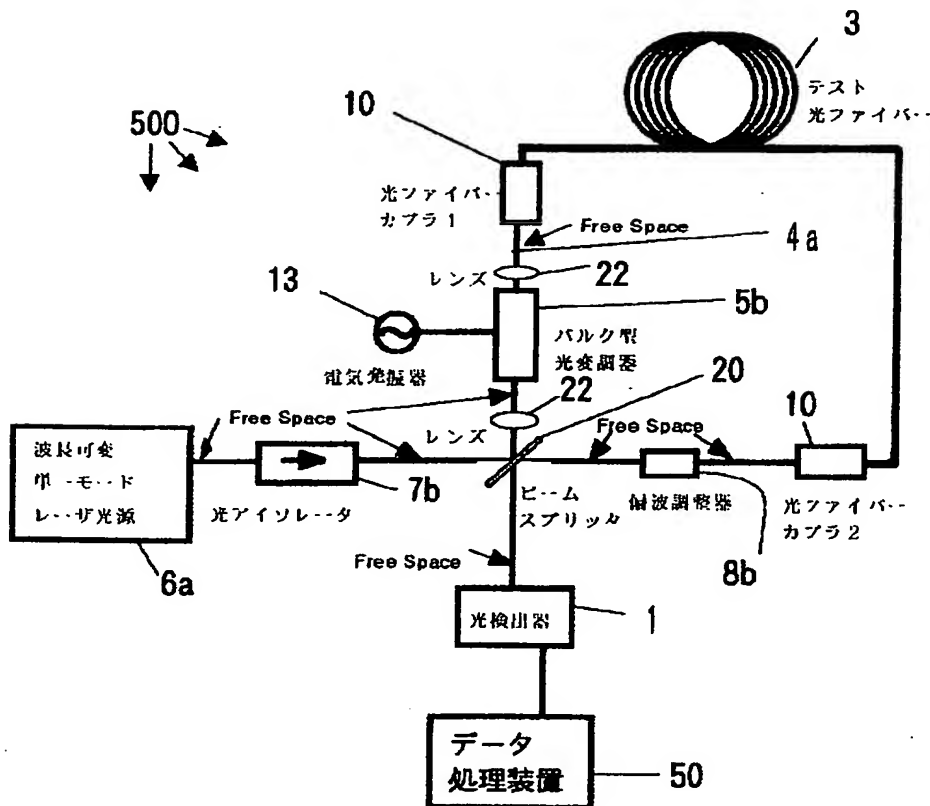
【図3】



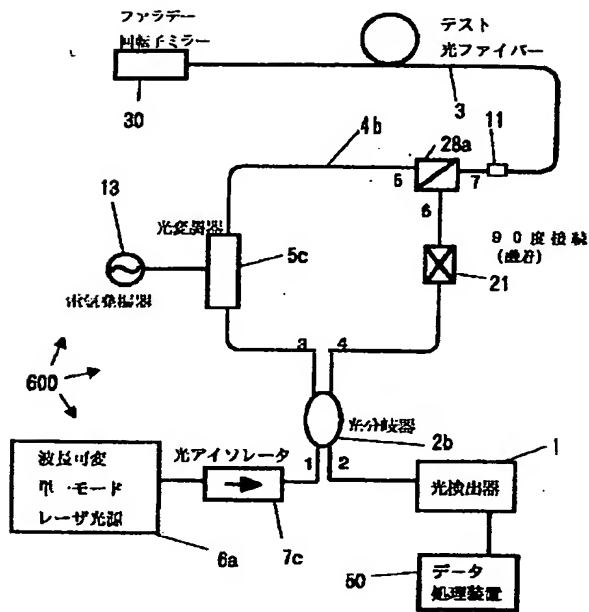
【図4】



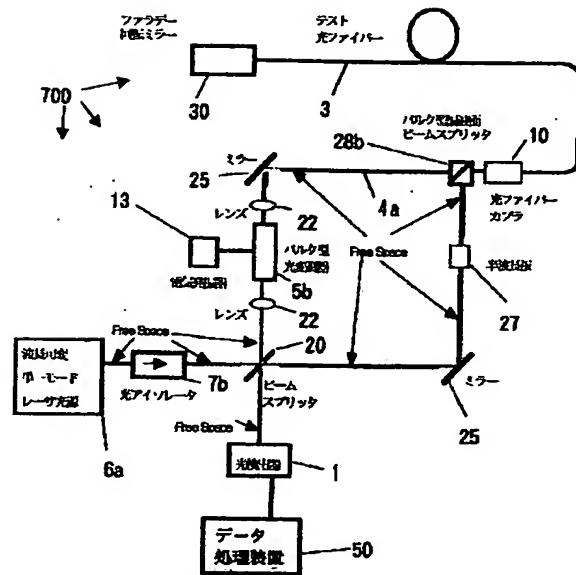
【図5】



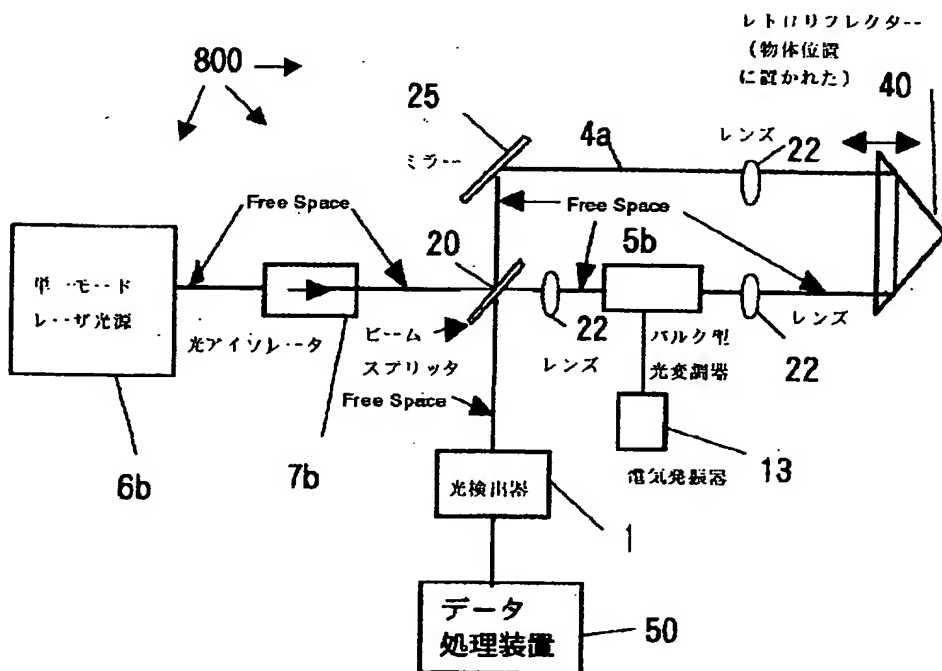
【図6】



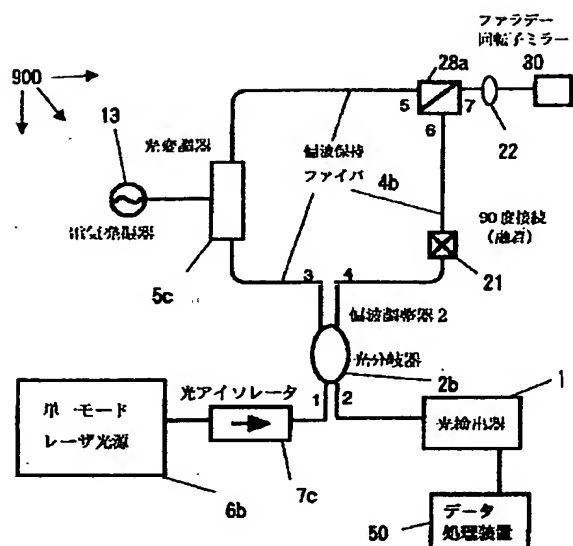
【図7】



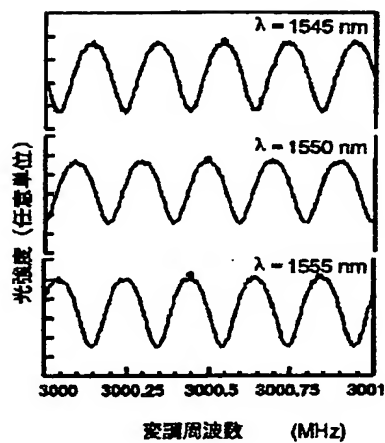
【図8】



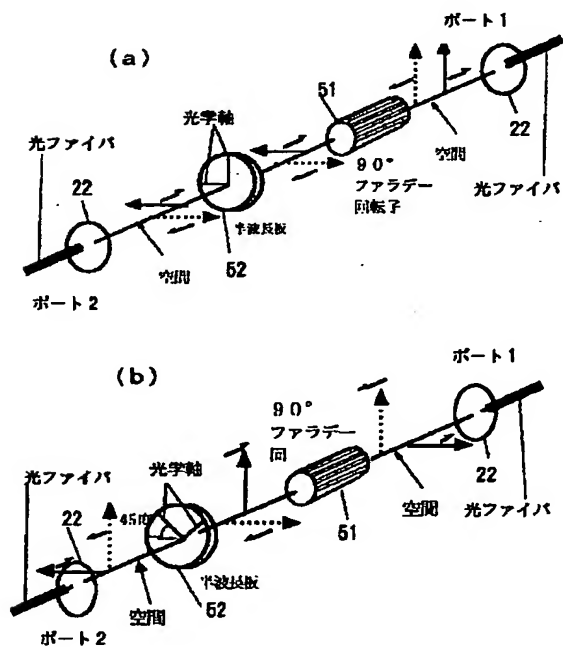
【図9】



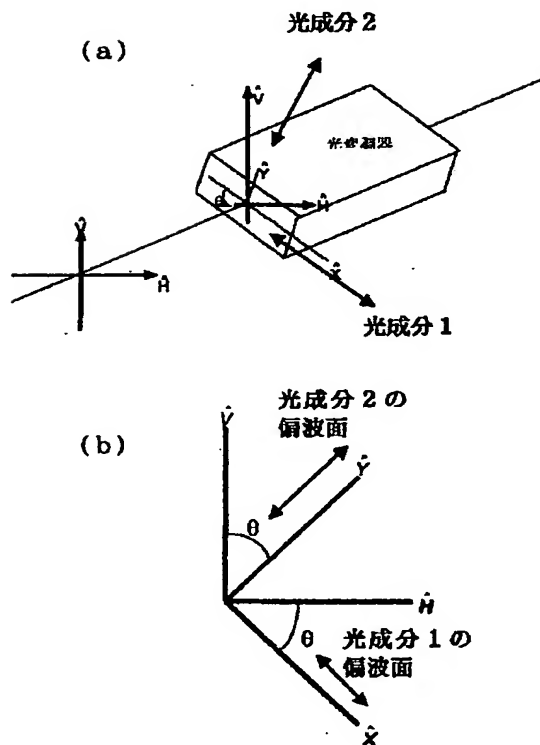
【図11】



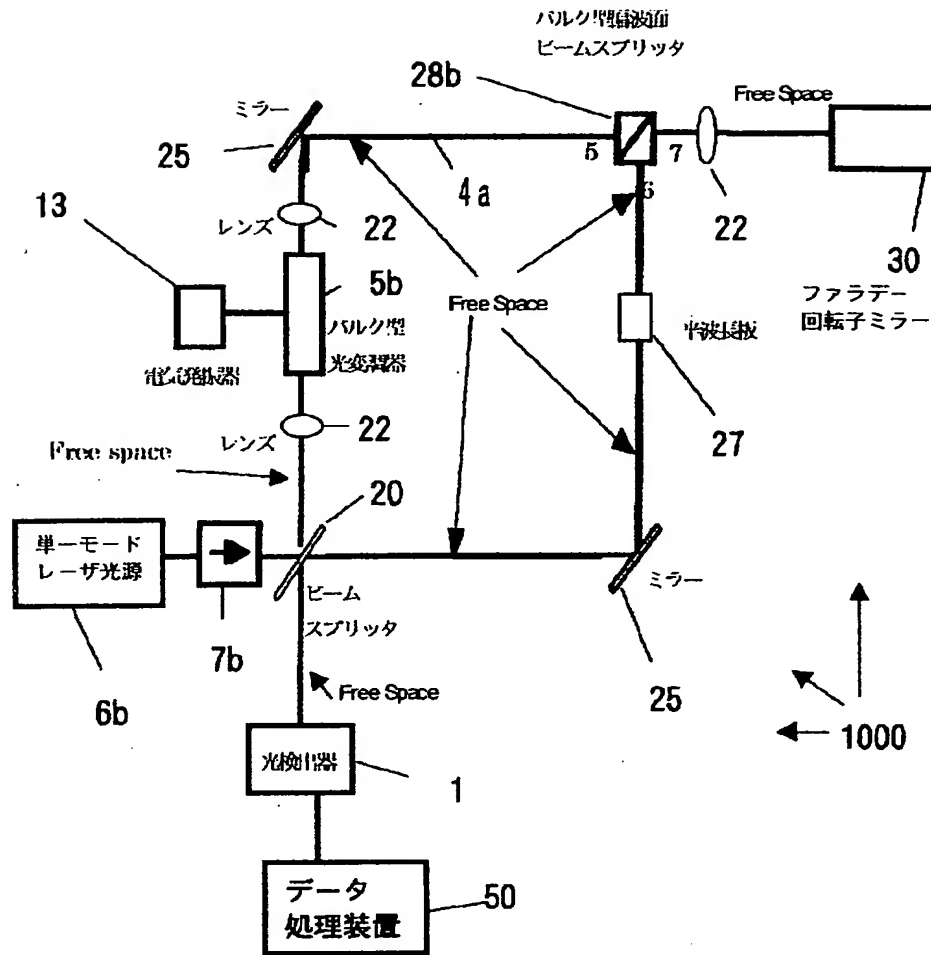
【図12】



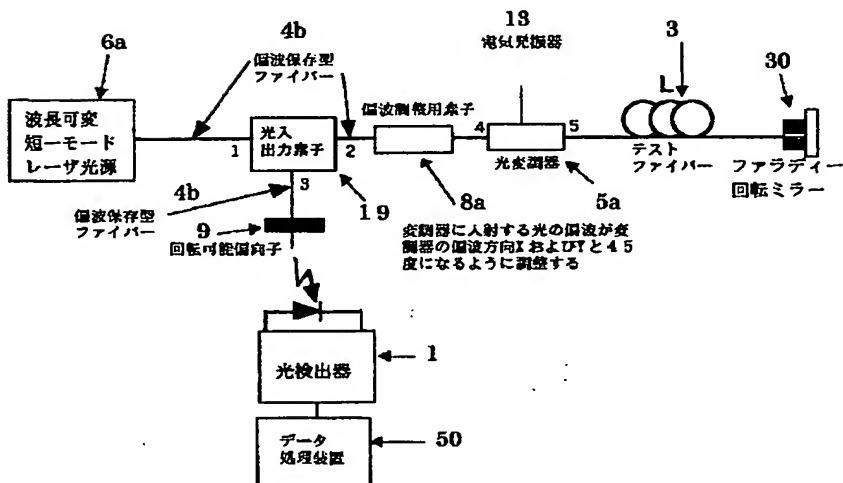
【図14】



【図10】

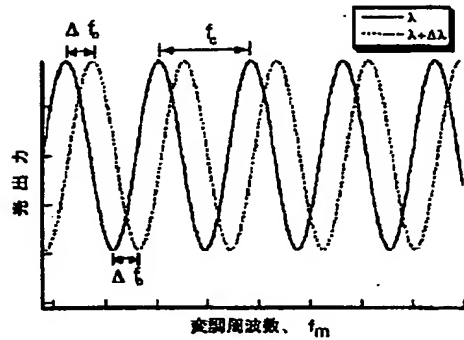


【図13】

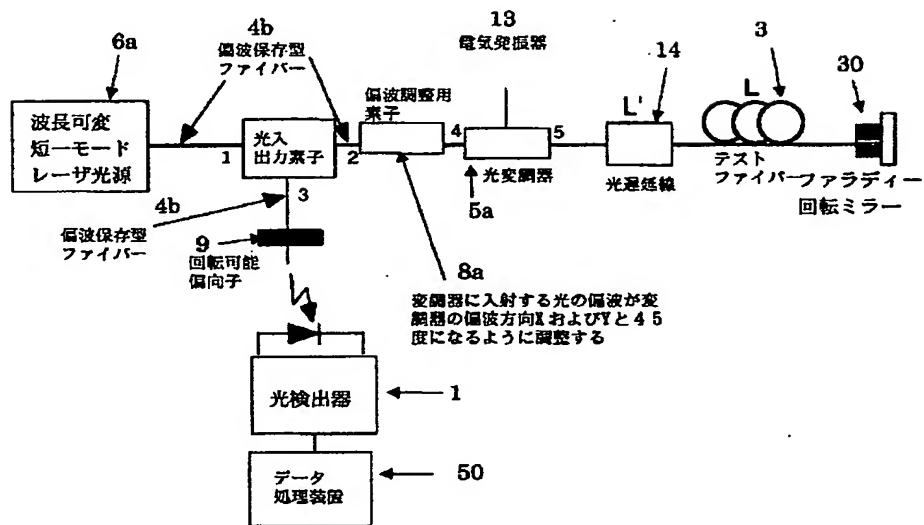


【図15】

変調周波数及び入射光の波長に対する出力の変化

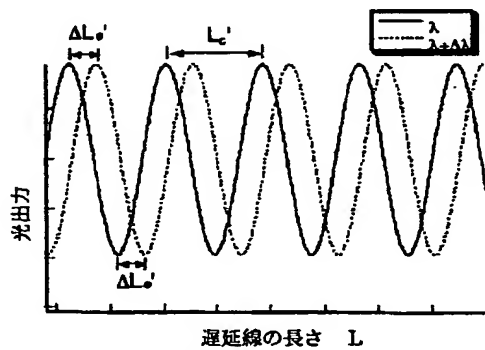


【図16】

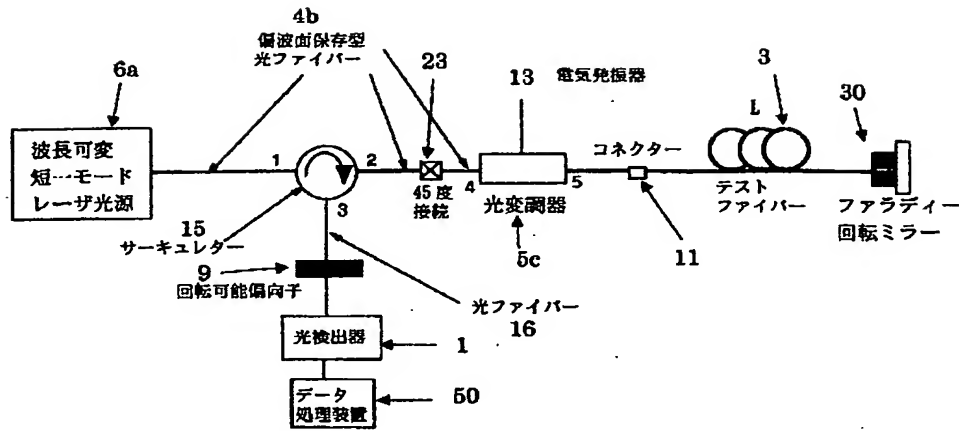


【図17】

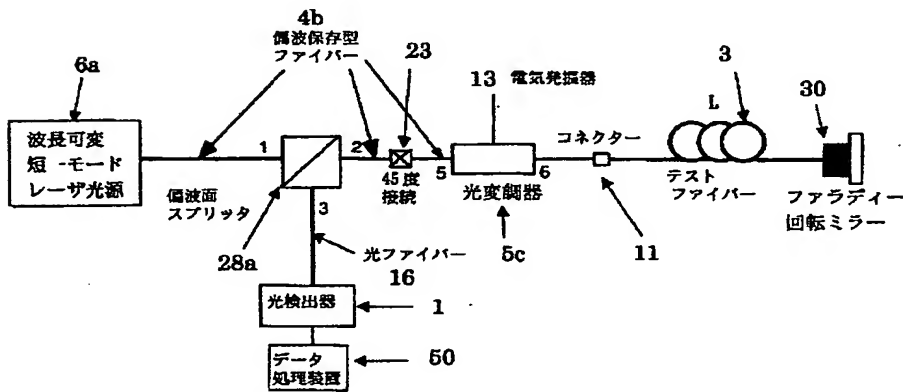
光遅延線の長さ及び入射光の波長に対する出力の変化



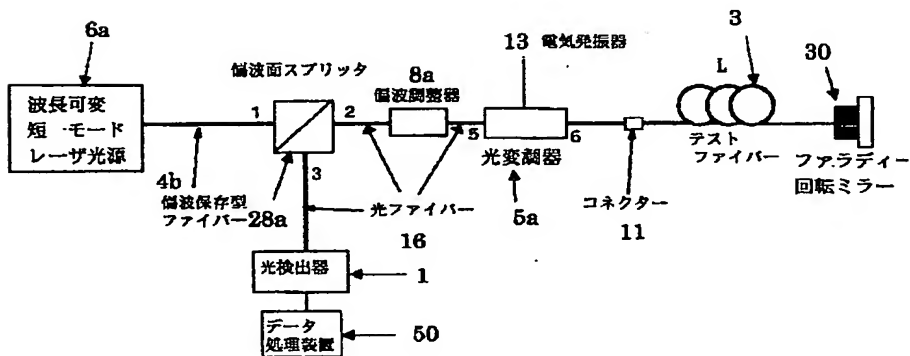
【図18】



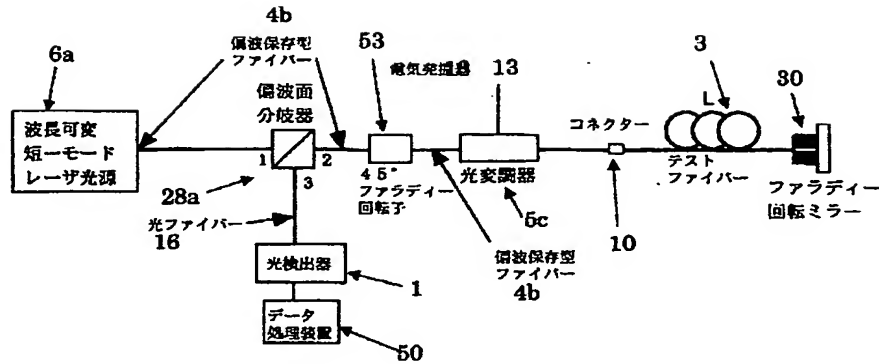
【図19】



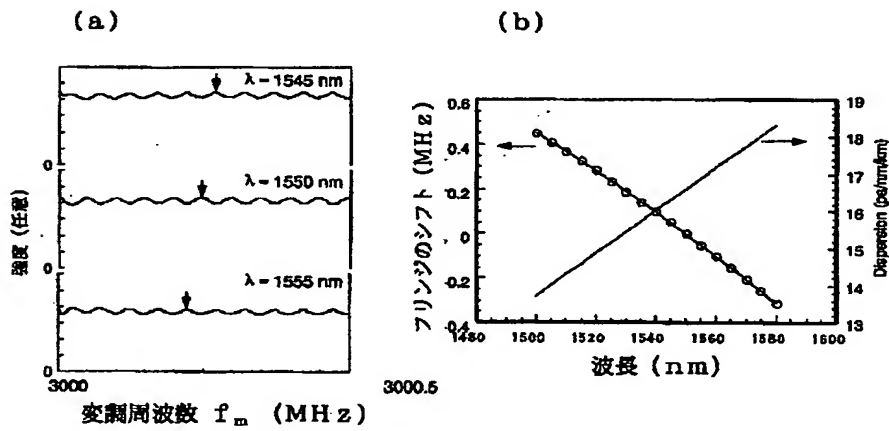
【図20】



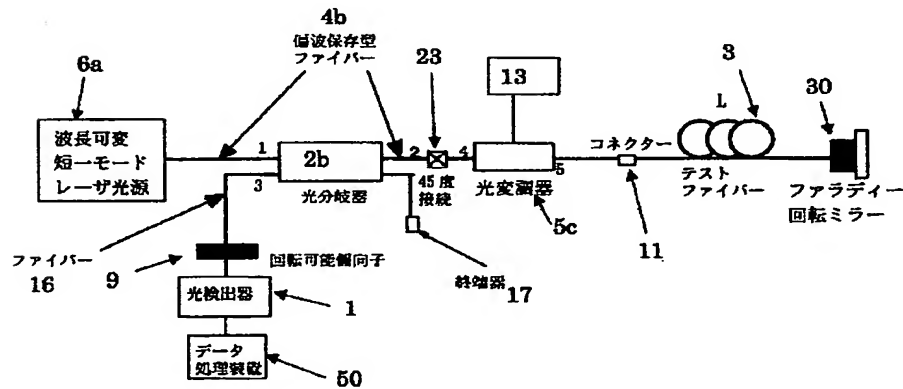
【図21】



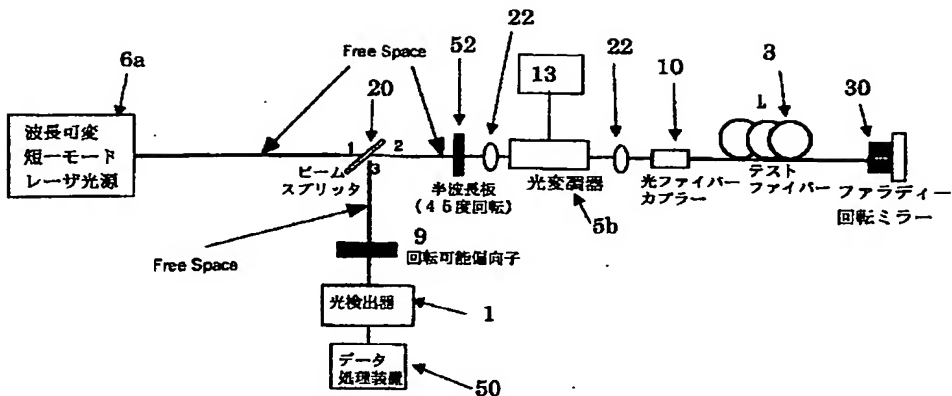
【図22】



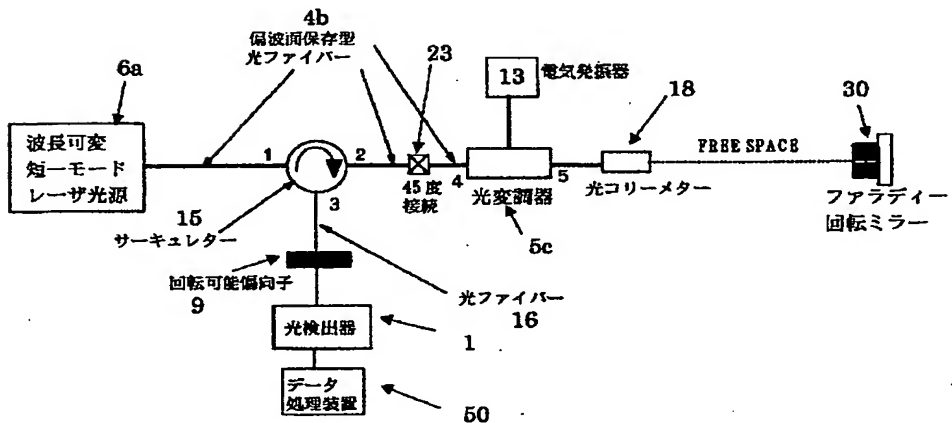
【図23】



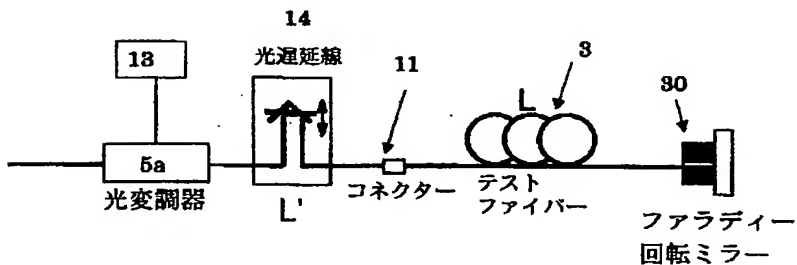
【圖 24】



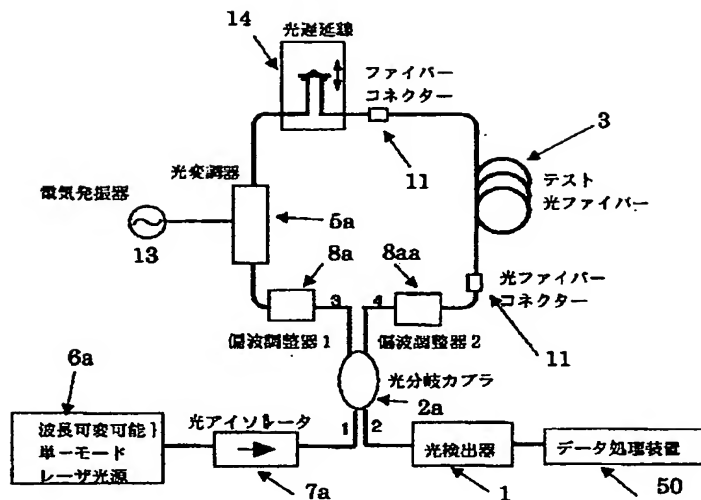
【图25】



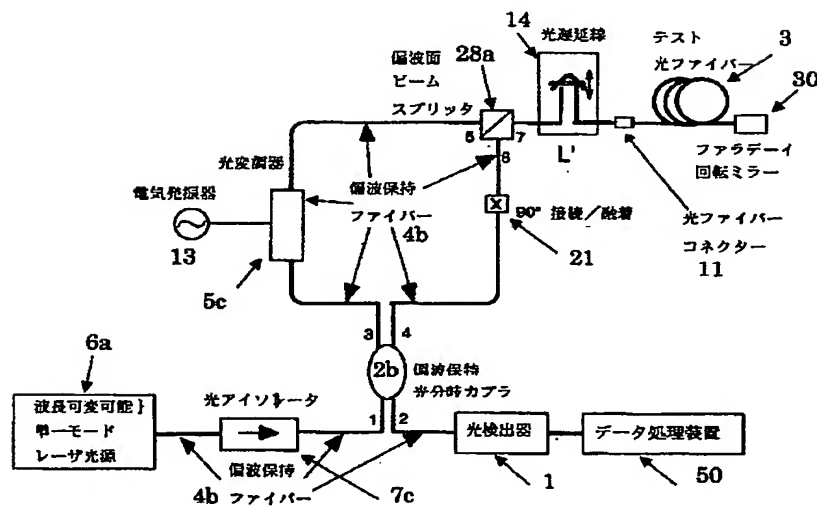
【图 26】



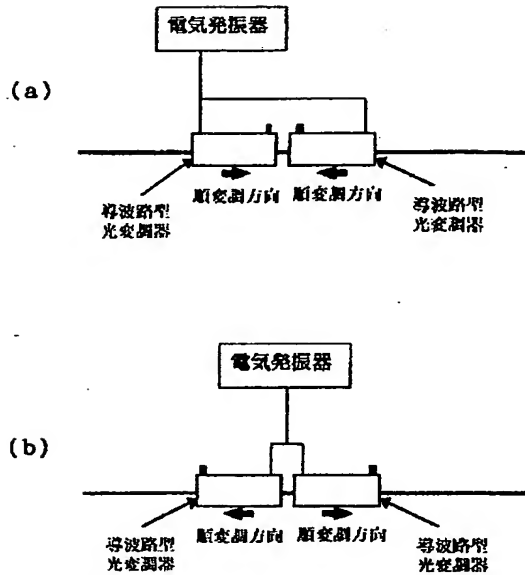
【図27】



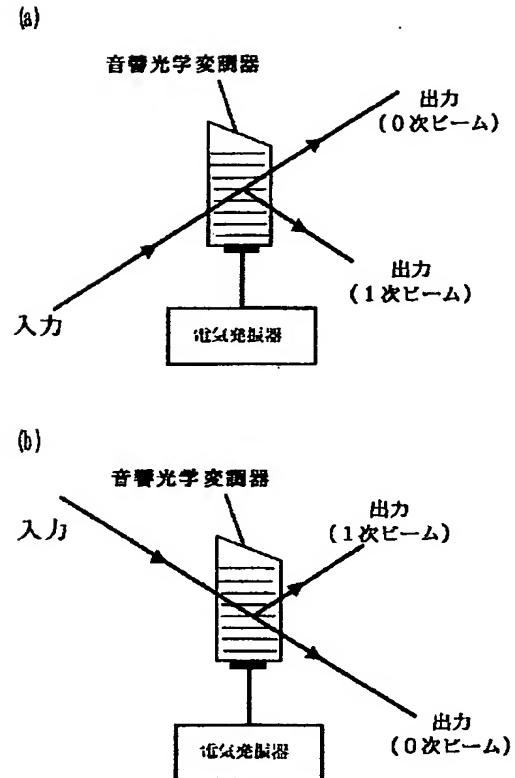
【図28】



【図29】



【図30】



フロントページの続き

(72)発明者 カジ サルワル アベディン
兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡588-2 郵
政省通信総合研究所 関西先端研究センタ
ー内

Fターム(参考) 2H079 AA02 AA12 AA13 CA11 EA11
FA03 KA06 KA11 KA17 KA18